

Inhalt

Vorwort zur 5. Auflage	5
Ein besonderer Dank	7
Hinweise aus den bisherigen Vorworten der Vorläuferausgaben in Kurzform	9
1 Einleitung	25
2 Schutz gegen elektrischen Schlag – gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel nach DIN EN 61140 (VDE 0140-1):2016-11	29
2.1 Anwendungsbereich	29
2.2 Grundsätzliche Anforderungen für den Schutz gegen elektrischen Schlag	30
2.3 Schutzvorkehrungen (Bestandteile der Schutzmaßnahmen)	30
2.3.1 Vorkehrungen für den Basisschutz	31
2.3.2 Vorkehrungen für den Fehlerschutz	31
2.3.3 Verstärkte Schutzvorkehrungen	32
2.4 Schutzmaßnahmen	32
2.5 Koordinieren der elektrischen Betriebsmittel mit den Schutzvorkehrungen in der elektrischen Anlage	33
2.6 Grenzen von Wechselstromanteilen der Schutzleiterströme von elektrischen Verbrauchsmitteln	34
2.7 Anhang A: Übersicht der Schutzmaßnahmen und deren Erfüllung durch Schutzvorkehrungen	35
3 Aufbau von Stromversorgungssystemen nach DIN VDE 0100-100:2009-06	39
3.1 Schutz zum Erreichen der Sicherheit	39
3.2 Schutz gegen elektrischen Schlag	40
3.2.1 Basisschutz (Schutz gegen direktes Berühren)	40
3.2.2 Fehlerschutz (Schutz bei indirektem Berühren)	40
3.3 Planung einer elektrischen Anlage	41
3.4 Zweck, Stromversorgung und Aufbau einer Anlage	42
3.4.1 Leiteranordnung	42
3.4.2 Systeme nach Art der Erdverbindung	43

3.4.2.1	TN-Systeme	45
3.4.2.2	TT-Systeme.....	46
3.4.2.3	IT-Systeme	46
4	Elektrische Anlagen und Schutzmaßnahmen	
	nach DIN VDE 0100-410:2018-10	51
4.1	Allgemeines	51
4.2	Schutzmaßnahme: automatische Abschaltung der Stromversorgung.....	52
4.2.1	Anforderungen an den Basisschutz	53
4.2.2	Anforderungen an den Fehlerschutz.....	53
4.2.2.1	Schutzerdung	53
4.2.2.2	Schutzzpotentialausgleich	54
4.2.3	Automatische Abschaltung im Fehlerfall	54
4.2.3.1	Abschaltzeiten für TN- und TT-Systeme	55
4.2.3.2	Weitere Anforderungen für Steckdosen in Endstromkreisen und für die Versorgung von ortsveränderlichen Betriebsmitteln für den Außenbereich	56
4.2.3.3	Besonderheiten für IT-Systeme	57
4.2.3.4	Zusätzliche Anforderungen für Leuchtenstromkreise in TN- und TT- Systemen.....	57
4.3	TN-Systeme	58
4.4	TT-Systeme.....	59
4.5	IT-Systeme	60
4.5.1	IT-Systeme ohne Abschaltung beim ersten Isolationsfehler.....	61
4.5.2	IT-Systeme nach Auftreten eines zweiten Fehlers	62
4.6	FELV.....	63
4.7	Schutzmaßnahme: doppelte oder verstärkte Isolierung	65
4.8	Schutzmaßnahme: Schutztrennung.....	66
4.9	Schutzmaßnahme: Schutz durch Kleinspannung mittels SELV oder PELV.....	66
4.10	Zusätzlicher Schutz.....	67
4.10.1	Der zusätzliche Schutz kann durch Fehlerstromschutzeinrichtungen (RCDs) erreicht werden	67
4.10.2	Der zusätzliche Schutz durch zusätzlichen Schutzzpotentialausgleich ..	67
4.11	Anhänge von DIN VDE 0100-410:2018-10.....	68
4.11.1	Anhang A (normativ) – Vorkehrungen für den Basisschutz unter normalen Bedingungen	68
4.11.2	Anhang B (normativ) – Vorkehrungen für den Basisschutz unter besonderen Bedingungen – Hindernisse und Anordnung außerhalb des Handbereichs.....	68

4.11.3	Anhang C (normativ) – Schutzvorkehrungen zur ausschließlichen Anwendung, wenn die Anlage nur durch Elektrofachkräfte oder elektrotechnisch unterwiesene Personen betrieben und überwacht wird.	69
4.11.4	Anhang D (normativ) – Vorkehrungen, wenn automatische Abschaltung in der geforderten Zeit nach DIN VDE 0100-410:2018-10, Abschnitt 411.3.2 nicht erreicht werden kann	70
4.11.5	Anhang ZA (normativ) – besondere nationale Bedingungen	70
4.11.6	Anhang ZB (informativ) – A-Abweichungen	71
4.12	Schutzarten für Abdeckungen und Umhüllungen.	71
4.12.1	Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code) nach DIN EN 60529 (VDE 0470-1).	71
4.12.1.1	Bedeutung der ersten Kennziffer – Schutzgrade gegen Zugang zu gefährlichen Teilen und gegen feste Fremdkörper.	74
4.12.1.2	Bedeutung der zweiten Kennziffer – Schutzgrade gegen Wasser	74
4.12.1.3	Bedeutung der zusätzlichen Buchstaben nach den Kennziffern.	74
4.12.1.4	Bedeutung der ergänzenden Buchstaben nach den Kennziffern	77
4.12.2	Bezeichnungsbeispiele mit dem IP-Code.	78
4.13	Geräte zum Prüfen der Schutzmaßnahmen	80
4.14	Erläuterungen zum IT-System nach DIN VDE 0100-410:2018-10	83
4.15	Literatur	92
5	Aufbau und Wirkweise von Schutzmaßnahmen in ungeerdeten IT-Systemen.	93
5.1	Terminologie und Begriffe	94
5.1.1	Aus DIN VDE 0100-200:2006-06	94
5.1.2	Aus DIN VDE 0100-410:2018-10	94
5.1.3	Aus DIN VDE 0100-540:2012-06	94
5.1.4	Sonstige Begriffe	95
5.2	Grundsätzlicher Aufbau von IT-Systemen	96
5.2.1	Abschaltbedingungen in IT-Systemen	97
5.2.2	Auftreten eines ersten Fehlers in IT-Systemen	98
5.2.3	Auftreten eines zweiten Fehlers in IT-Systemen	98
5.2.4	Berechnungsbeispiel für ein einphasiges IT-System bei zwei Fehlern	99
5.2.4.1	Beispielrechnung	100
5.3	Der Potentialausgleich in IT-Systemen.	102

5.3.1	Der Schutzzpotentialausgleich in IT-Systemen nach DIN VDE 0100-410:2018-10.	102
5.3.1.1	Der Schutzzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene nach DIN VDE 0100-410:2018-10.	103
5.3.1.2	Der zusätzliche Schutzzpotentialausgleich in IT-Systemen.	103
5.3.2	Wirkung des zusätzlichen Schutzzpotentialausgleichs (ZPA) in IT-Systemen	106
5.3.3	Abschaltung beim zweiten Fehler in IT-Systemen.	107
5.3.4	Berechnungsbeispiel für Berührungsspannungen mit ZPA in IT-Systemen	109
5.4	Erdungswiderstand und Netzableitkapazitäten in IT-Systemen	112
5.4.1	Fehlerstrom beim ersten Fehler in IT-Systemen.	113
5.4.2	Natürliche Netzableitkapazitäten (C_n)	114
5.4.3	Zusätzliche, in den Betriebsmitteln eingebaute Entstörfilter (EMV-Filter)	116
5.4.4	Die Berührungsspannungen	117
5.4.5	Messung an einem aktiven IT-System	118
5.4.6	Messergebnisse	120
5.4.7	Messung des Fehlerstroms I_d	121
5.4.8	Ausblick	121
5.5	Berührungsspannungen in ungeerdeten IT-Systemen.	122
5.5.1	Kabel- und Leitungskapazitäten.	123
5.5.2	Natürliche Netzableitkapazitäten (C_n)	123
5.5.3	Berechnungsgrundlagen für Fehlerstrom und Berührungsspannung	125
5.5.4	Parameter zur Berührungsspannung.	129
5.5.5	Ermittlung der Berührungsspannung und der natürlichen Netzableitkapazitäten C_n	130
5.5.6	Zusammenfassung und Ausblick	132
5.6	Literatur	133
6	Ungeerdete IT-Systeme.	135
6.1	Beispiel für IT-System mit zusätzlichem Schutzzpotentialausgleich und Isolationsüberwachung	136
6.2	Zusätzlicher Schutzzpotentialausgleich in IT-Systemen	139
6.2.1	Anforderungen an den zusätzlichen Schutzzpotentialausgleich	140
6.3	Prüfungen von IT-Systemen nach DIN VDE 0100-600:2017-06.	141
6.3.1	Begriffe	142
6.3.2	Erstprüfung	143
6.3.3	Besichtigen	144
6.3.4	Erproben und Messen	146

6.3.5	Isolationswiderstand der elektrischen Anlage	148
6.3.6	Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung	149
6.4	Schutzmaßnahmen zum Schutz bei Überstrom nach DIN VDE 0100-430:2010-10.	151
6.4.1	Schutz der Außenleiter	151
6.4.2	Schutz des Neutralleiters	152
6.4.2.1	TT- oder TN-Systeme	152
6.4.2.2	IT-System	152
6.4.3	Schutz bei Überlastströmen	153
6.4.3.1	Koordinierung zwischen Leitern und Einrichtungen zum Schutz bei Überlast.	153
6.4.3.2	Anordnung oder Verzicht auf Einrichtungen zum Schutz bei Überlast in IT-Systemen	153
6.5	Anschluss von Isolationsüberwachungsgeräten	154
6.5.1	Ankopplung und Absicherung	154
6.5.2	Hilfsspannungsversorgung und Absicherung	155
6.6	Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Schalt- und Steuergeräte nach DIN VDE 0100-530:2018-06	156
6.6.1	Allgemeine und gemeinsame Anforderungen	156
6.6.2	Einrichtungen zum Schutz gegen elektrischen Schlag durch automatische Abschaltung der Stromversorgung.	157
6.6.2.1	Allgemeines	157
6.6.2.2	Auswahl von Schutz- und Überwachungseinrichtungen	157
6.6.2.3	Einrichtungen zum Trennen	158
6.6.2.4	Einrichtungen zum Schalten.	158
6.6.2.5	Einrichtungen zur Überwachung für IT-Systeme/ Isolationsüberwachungseinrichtungen (IMDs).	158
7	Besonderheiten und Vorteile von IT-Systemen	159
7.1	Höhere Betriebssicherheit.	160
7.2	Höherer Brandschutz	161
7.3	Größerer Unfallschutz infolge begrenzter Berührungsströme	164
7.4	Höherer zulässiger Erdungswiderstand	164
7.5	Informationsvorsprung durch IT-Systeme	166
7.5.1	Wartung und Instandhaltung von elektrischen Versorgungssystemen .	169
7.5.2	Begriffe der Instandhaltung	170
7.5.3	Instandhaltungsstrategien in IT-Systemen	171
8	Anwendungen von IT-Systemen	173
8.1	IT-Systeme im Bergbau	173

8.1.1	Schutztechnik im Bergbau	174
8.1.2	Schutztechnik im Bergbau nach DIN EN 50628 (VDE 0118-10)	176
8.1.2.1	Schutz im IT-System.	177
8.1.2.1.1	Erdschlusserkennung	177
8.1.2.1.2	Design eines IT-Systems.	178
8.1.2.1.3	Isolationsüberwachung	179
8.2	IT-Systeme und die Isolationsüberwachung auf Schiffen	180
8.2.1	Vorschriften und Bestimmungen	180
8.2.2	Zulässige Netzformen auf Schiffen	181
8.2.3	TN- und IT-Systeme auf Schiffen.	181
8.2.4	IT-Systeme auf Schiffen der Bundeswehr nach BV 30	184
8.2.5	Anwendungsbeispiel.	186
8.2.5.1	IT-System mit Isolationsüberwachung auf einem Kreuzfahrtschiff	186
8.2.5.2	IT-System mit Isolationsüberwachung auf einem Flugzeugträger	188
8.3	IT-Systeme mit Isolationsüberwachung auf Schienenfahrzeugen	189
8.3.1	Anwendungsbeispiele für IT-Systeme mit Isolationsüberwachung	190
8.3.2	Einsatzorte von IT-Systemen mit Isolationsüberwachung	191
8.3.3	Anforderungen an Isolationsüberwachungseinrichtungen	191
8.3.4	Batteriegepuffertes sicherheitsgerichtetes Gleichspannungsnetz	192
8.3.5	Umrichter in Hauptstromkreisen	193
8.4	IT-Systeme mit Isolationsüberwachung in Elektrofahrzeugen.	194
8.4.1	Anforderungen an die Bordnetze von E-Fahrzeugen	194
8.4.2	Ladebetriebsarten für E-Fahrzeuge	195
8.4.3	Internationale Normen der Elektromobilität.	195
8.4.3.1	Isolationsüberwachungsgeräte nach UL 2231	196
8.4.3.1.1	UL 2231-1 Standard for Safety for Personnel Protection Systems for Electric Vehicles (EV) Supply Circuits – General Requirements	196
8.4.3.1.2	UL 2231-2 Standard for Safety for Personnel Protection Systems for Electric Vehicle (EV) Supply Circuits – Particular Requirements for Protection Devices for Use in Charging Systems	197
8.4.4	Schutz gegen elektrischen Schlag in Formel-1-Fahrzeugen.	199
8.4.4.1	Entwicklung der aktiven Messtechnik	201
8.4.4.2	Ausblick	202
8.5	Elektrische Sicherheit in Photovoltaik-Großanlagen	202
8.5.1	Aufbau einer Photovoltaik-Großanlage	203
8.5.2	Erfolgsfaktor IT-System	203
8.5.3	Ständige Isolationsüberwachung	203
8.5.4	Schnelle Suche, geringe Kosten	204
8.5.5	Zusammenfassung	204
8.6	Literatur	205

9	Isolationswiderstand	207
9.1	Erste Sicherheitsvorschriften 1883 in Deutschland	208
9.2	Komplexes Gebilde	209
9.3	Begriff: Isolationswiderstand	209
9.4	Einflussgrößen	210
9.5	Isolationsmessung und Überwachung	211
9.5.1	Die Messung im spannungsfreien Netz	211
9.5.2	Differenzstrommessungen in TN- und TT-Systemen	212
9.5.3	Die ständige Überwachung des Absolutwerts in IT-Systemen	212
9.6	Komplettüberwachung in IT-Systemen	213
10	Gefährdung des Menschen durch Körperströme	215
10.1	Wirkung des elektrischen Stroms auf Menschen und Nutztiere nach DIN IEC/TS 60479-1 (VDE V 0140-479-1):2007-05	216
10.1.1	Anwendungsbereich	217
10.1.2	Begriffe	218
10.1.3	Elektrische Impedanz des menschlichen Körpers	219
10.1.4	Sinusförmiger Wechselstrom mit 50 Hz/60 Hz bei großen Berührungsflächen	219
10.1.5	Wirkungen von sinusförmigen Wechselströmen im Bereich von 15 Hz bis 100 Hz	221
10.1.6	Wirkungen von Gleichstrom	224
10.2	Grundsätzliche Erkenntnisse der Elektropathologie	228
10.3	Konsequenzen für Schutzmaßnahmen gegen gefährliche Körperströme	229
10.4	Unfälle durch elektrischen Strom	229
10.5	Literatur	230
11	Gerätenormen für Einrichtungen zur Isolationsüberwachung und Isolationsfehlersuche	231
11.1	Isolationsüberwachungsgeräte für IT-Systeme nach DIN EN 61557-8 (VDE 0413-8):2015-12	231
11.2	Typen von IMD	235
11.3	Vorgeschriebene Funktionen von IMD	235
11.4	Anforderungen an das Betriebsverhalten	235
11.4.1	Sollansprechwert R_{an}	235
11.4.2	Netzableitkapazität C_e	236
11.4.3	Prozentuale Ansprechunsicherheit A des Sollansprechwerts R_{an}	236
11.4.4	Ansprechzeit t_{an}	236
11.4.5	Messspannung und Messstrom	236

11.5	Isolationsüberwachungsgeräte nach DIN VDE 0100-530:2018-06	237
11.6	Isolationsüberwachungsgeräte nach US-amerikanischen ASTM-Normen	240
11.6.1	ASTM F1207M-12 Standard Specification for Electrical Insulation Monitors for Monitoring Ground Resistance in Active Electrical Systems	240
11.6.2	ASTM F1134-15e1 Standard Specification for Insulation Resistance Monitor for Shipboard Electrical Motors and Generators	240
11.6.3	ASTM F1669M-12 Standard Specification for Insulation Monitors for Shipboard Electrical Systems	241
11.7	Unterscheidung zwischen Isolationsüberwachungsgeräten und Differenzstromüberwachungsgeräten	242
11.8	Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche in IT-Systemen nach DIN EN 61557-9 (VDE 0413-9):2015-10	243
11.9	Anforderungen zur Funktionalen Sicherheit von Isolationsüberwachungsgeräten in IT-Systemen und von Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche in IT-Systemen nach DIN EN 61557-15 (VDE 0413-15):2014-10	247
11.10	Literatur	247
12	Messtechnische Realisierung von Isolationsüberwachungs- geräten und Erdschlusswächtern	249
12.1	Isolationsüberwachung von Wechsel- und Drehstrom-IT-Systemen	249
12.1.1	Messung ohmscher Isolationsfehler	249
12.1.2	Messung der Ableitimpedanz	252
12.2	Wechselspannungsnetze mit direkt angeschlossenen Gleichrichtern oder Thyristoren	253
12.2.1	Messverfahren mit Umkehrstufe	253
12.2.2	Messverfahren durch Impulsüberlagerung	255
12.3	Gleichspannungsnetze	256
12.3.1	Unsymmetriemessverfahren	256
12.3.2	Messverfahren durch Impulsüberlagerung	258
12.4	Messverfahren zur universellen Anwendung in Wechsel- und Gleichspannungs-IT-Systemen	259
12.4.1	Mikrocontroller-gesteuertes AMP-Messverfahren zum universellen Einsatz in Wechsel- und Gleichspannungs-IT-Systemen	259
12.4.2	Mikroprozessor-gesteuertes Frequenzcodemessverfahren für IT-Systeme mit extremer Störbeeinflussung	261
12.5	Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche in Wechsel- und Gleichspannungs-IT-Systemen	262

12.5.1	Stationäre Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche für Gleichspannungs-IT-Systeme	263
12.5.2	Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche für Wechsel- und Gleichspannungs-IT-Systeme	264
12.5.3	Tragbare Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche für Wechselstrom-, Drehstrom- und Gleichspannungs-IT-Systeme	266
12.6	Zusammenfassung und Ausblick	269
13	Auswahl der Ansprechwerte von Isolationsüberwachungsgeräten (IMDs)	271
13.1	Ansprechwerteinstellung für ohmsche Isolationswerte	271
13.2	Ansprechwerteinstellung in Hilfsstromkreisen	274
13.3	Ansprechzeiten von Isolationsüberwachungsgeräten	274
14	Physik der IT-Systeme	277
14.1	Ableitströme in IT-Systemen	277
14.1.1	Berechnung der Ableitströme in IT-Systemen	279
14.1.2	Ermittlung der Ableitkapazitäten im abgeschalteten Netz	279
14.1.3	Ermittlung der Ableitkapazitäten im Betrieb	280
14.2	Spannungsverhältnisse in Wechselspannungs-IT-Systemen	281
14.3	Überspannungen in Wechselstrom- und Drehstrom-IT-Systemen	283
14.3.1	Quellen der Überspannungen	284
14.3.2	Ausgleichsvorgänge bei einpoligem Isolationsfehler	285
14.3.3	Stationäre Spannungsüberhöhungen	286
14.3.4	Intermittierender Erdschluss	287
14.3.5	Isolationsfehler im speisenden System	288
14.3.6	Schalten von Induktivitäten	288
14.3.7	Schalten von Leitungen und Kondensatoren	289
14.3.8	Resonanzen und Oberschwingungen	289
14.3.9	Spannungsüberhöhungen bei Kurzschlussabschaltung	289
14.4	Das IT-System und der zweite Fehler	290
14.4.1	Der „erste Fehler“	290
14.4.2	Der „zweite Fehler“	291
14.4.3	Der „erste Isolationsfehler“	292
14.4.4	Fehlermöglichkeiten in einem Wechselspannungs-IT-System	293
14.5	Literatur	294
15	Bestimmungen und Normentexte zu IT-Systemen	295

16	Wissenswertes zu IT-Systemen	307
16.1	Zur Geschichte des ungeerdeten Stromversorgungsnetzes	307
16.2	Zur Geschichte des Schutzleitungssystems und der Isolationsüberwachung	315
16.3	Kleine Wechselstromnetze nach <i>Walther Bender</i>	324
16.4	Erste Gerätenormen zur Isolationsüberwachung	328
16.4.1	Isolationsüberwachungsgeräte zur Überwachung von Wechsel- spannungsnetzen nach der früheren DIN VDE 0413-2:1973-01	328
16.4.2	Isolationsüberwachungsgeräte für Wechselspannungsnetze mit galvanisch verbundenen Gleichstromkreisen oder Gleich- spannungsnetze nach der früheren DIN VDE 0413-8:1994-02	328
16.5	IT-Systeme und die Isolationsüberwachung in medizinisch genutzten Räumen nach DIN VDE 0107 – geschichtlicher Überblick	329
16.6	Literatur	332
Anhang A Begriffe zur Isolationsüberwachung		333
A.1	Begriffe aus DIN EN 61557-8 (VDE 0413-8)	333
A.2	Begriffe der Isolationsüberwachung – andere Quellen	341
Anhang B Normenreferenzliste		342
Anhang C Verwendete Abkürzungen		359
Anhang D Normenarbeit und Normenrecht		361
D.1	Allgemeines	361
D.2	Normenorganisationen	362
D2.1	CENELEC – die europäische Normenorganisation	362
D2.2	Begriffe und Bezeichnungen im CENELEC	364
D2.3	Gewichtete Abstimmung	366
D2.4	Nutzen der europäischen Normung	368
D2.5	Harmonisierungsdokumente	368
D2.6	Besondere nationale Bedingungen	369
D2.7	A-Abweichungen	370
D.3	Normung und Recht	370
D3.1	Normen in der Rechtsordnung	370
D3.2	Deregulierung	371
D3.3	Neues Konzept – New Approach	371
D3.3.1	Stand der Technik	373
D3.3.2	Allgemein anerkannte Regeln der Technik	374
D3.3.3	Vermutungswirkung	374

D3.3.4	Urheberrecht	374
D3.3.5	Normen und Patente	375
D3.3.6	Haftungsrelevanz der Normung	375
D3.3.7	CE-Kennzeichnung	376
D3.3.7.1	Konformitätsbewertungsverfahren	377
D3.3.7.2	Bedeutung der CE-Kennzeichnung	377
D3.3.8	Inverkehrbringen	377
D3.3.9	Produkthaftung/Produzentenhaftung	378
Anhang E	Schutzvorkehrungen in Normen der Elektrotechnik	381
Stichwortverzeichnis		385