

Inhalt

Vorwort	5
Ein besonderer Dank	7
1 Einleitung	15
1.1 Problembeschreibung	15
1.1.1 Medizinisch genutzte Bereiche der Gruppe 2	15
1.1.2 Herausforderungen bei der Risikobewertung	15
1.2 Inhaltliche Kurzübersicht dieser Arbeit	16
1.3 Verwendete Bezeichnungen und Symbole	19
2 Modellierung des ungeerdeten IT-Stromversorgungssystems	25
2.1 Systembestandteile des ungeerdeten IT-Systems	25
2.1.1 Trenntransformator	25
2.1.2 Isolationsüberwachungsgerät (IMD)	26
2.1.3 Betriebsmittel	27
2.1.4 Stromversorgung	28
2.1.5 Installation und Verkabelung	29
2.1.6 Schutzleiter und zusätzlicher Schutzpotentialausgleich	29
2.1.7 Erdung	30
2.2 Die grundlegende Fehlersituation	33
2.2.1 Elektrische Sicherheit und Risiken	34
2.2.1.1 Risiko 1: Ausfall der Stromversorgung	34
2.2.1.2 Risiko 2: Brand	35
2.2.1.3 Risiko 3: Elektrischer Schlag	35
2.2.2 Fokus auf Isolationsfehler	36
2.2.3 „Erster-Fehler-Philosophie“	36
2.2.4 Modellierung der grundlegenden Fehlersituation	37
2.2.5 Die Bezeichnung von Fehler- und Ableitströmen im IT- und TN-System	42
2.3 Ursachen von Koppelimpedanzen	44
2.3.1 Ohm'sche und kapazitive Anteile der Koppelimpedanzen	45
2.3.2 Die Leitungskapazität	47
2.3.2.1 Sonderfälle: Verborgene Verteiler und Koaxialkabel	49
2.3.2.2 Fazit	50
2.3.3 Die natürliche Ableitkapazität	51

2.3.3.1	Sonderfall: Geschirmte Kabel	54
2.3.3.2	Fazit	55
2.3.4	Ohm'sche Beiträge der Installation	56
2.3.5	Die Koppelkapazität des Trenntransformators	57
2.3.5.1	Sonderfall: Trenntransformator ohne Schutzleiteranschluss	59
2.3.5.2	Fazit	62
2.3.6	Ohm'sche Beiträge des Trenntransformators.	63
2.3.7	Beiträge durch das Isolationsüberwachungsgerät (IMD)	64
2.3.8	Beiträge durch Betriebsmittel	67
2.3.8.1	Normative Grenzwerte für die Koppelimpedanz.	68
2.4	Fehlerströme und Fehlerspannungen	70
2.4.1	Der Trenntransformator als Konstantstromquelle	71
2.4.2	Der Gesamtfehlerstrom und der Fehlerstrom am Erder.	73
2.4.2.1	Fehlerstrommessungen mit dem Ableitstrommessadapter	73
2.4.2.2	Verhalten des Ableitstrommessadapters im Frequenzbereich	74
2.4.3	Variationen des ungeerdeten IT-Systems.	77
2.4.3.1	Anmerkungen zum Fehlerstrom I_n bei varB(of).	84
2.4.3.2	Anmerkungen zu den Fehlerströmen I_n bei varC und varD	84
2.4.4	Fehlerspannungen im Schutzleiter und an der Erdung	84
3	Modellierung des menschlichen Körpers	87
3.1	Gefahren durch elektrischen Strom	87
3.1.1	Übersicht der Gefahren durch den elektrischen Strom	87
3.1.1.1	Besondere Stromformen	91
3.1.2	Kriterium für Herzkammerflimmern: die max. Stromdichte.	93
3.1.3	Maximale Berührungsströme bei Mikro- und Makroschock.	95
3.1.3.1	Besondere Stromformen	97
3.2	Die Gesamtimpedanz des menschlichen Körpers	97
3.2.1	Die Bedeutung der Körperimpedanz bei Risikoabschätzungen	97
3.2.2	Körperimpedanz	98
3.2.3	Bestandteile des Gesamtkörperwiderstands	99
3.2.4	Abschätzung des minimalen Körperinnenwiderstands	101
3.3	Die wirksame Berührungsspannung	102
3.3.1	Ursachen der Berührungsspannung.	102
3.3.2	Definition und Messung der wirksamen Berührungsspannung.	103
3.3.3	Grenzwerte der wirksamen Berührungsspannung.	105
3.3.3.1	Fazit	107

4	Modellierung der grundlegenden Gefährdungssituation	109
4.1	Die Bodenplatte	109
4.1.1	Die wirksame Berührungsspannung mit Bodenplatte	109
4.1.1.1	Eigenschaften der Bodenplatte	110
4.1.1.2	Spannungsabfall an der Bodenplatte	112
4.1.1.3	Problematische Eigenschaften der Berührungsspannung	113
4.1.2	Bestimmung des Standortwiderstands	114
4.1.2.1	Fehlerrechnung für den Standortwiderstand	116
4.1.2.2	Fazit	121
4.1.3	Die natürliche Berührungsspannung	121
4.1.3.1	Bestimmung der natürlichen Berührungsspannung	123
4.1.3.2	Fazit	124
4.2	Die Berührungsschleife	125
4.2.1	Bedeutung der Berührungsschleife	125
4.2.2	Spannungen in der Berührungsschleife	127
4.2.3	Die zentrale Modellgleichung	128
4.3	Die max. Berührungsspannung	129
4.3.1	Definition der max. Berührungsspannung	129
4.3.2	Bestimmung der max. Berührungsspannung	130
4.3.2.1	Fehlerrechnung für die max. Berührungsspannung	131
5	Grenzwerte der max. Berührungsspannung	137
5.1	Grenzwert zum Schutz vor Makroschock	137
5.2	Grenzwert zum Schutz vor Mikroschock	138
5.2.1	Ursachen von Berührungsspannungen	140
5.2.1.1	Erdableitströme	140
5.2.1.2	Die Spannung an der Bodenplatte	141
5.2.1.3	Der Patientenableitstrom	141
5.2.2	Mikroschock-Szenarien	145
5.2.2.1	Herzanwendungen mit Katheter	145
5.2.2.2	Herzanwendungen mit Herzelektroden	148
5.2.2.3	Isolationsfehler im Versorgungsteil	151
5.2.2.4	Fehler im zusätzlichen Schutzpotentialausgleich	151
5.2.2.5	Isolationsfehler im Anwendungsteil	151
5.2.3	Bewertung der einzelnen Ursachen und Szenarien	152
5.2.3.1	1. Kombination von Mikroschock-Szenario und Ursache gemäß Tabelle 5.1	152
5.2.3.2	2. Kombination von Mikroschock-Szenario und Ursache gemäß Tabelle 5.1	152

5.2.3.3	3. Kombination von Mikroschock-Szenario und Ursache gemäß Tabelle 5.1	154
5.2.3.4	4. Kombination von Mikroschock-Szenario und Ursache gemäß Tabelle 5.1	156
5.2.3.5	5. Kombination von Mikroschock-Szenario und Ursache gemäß Tabelle 5.1	157
5.2.3.6	6. Kombination von Mikroschock-Szenario und Ursache gemäß Tabelle 5.1	157
5.2.3.7	7. Kombination von Mikroschock-Szenario und Ursache gemäß Tabelle 5.1	158
5.2.3.8	8. Kombination von Mikroschock-Szenario und Ursache gemäß Tabelle 5.1	158
5.2.3.9	9. Kombination von Mikroschock-Szenario und Ursache gemäß Tabelle 5.1	158
5.2.3.10	10. Kombination von Mikroschock-Szenario und Ursache gemäß Tabelle 5.1	159
5.2.3.11	11. Kombination von Mikroschock-Szenario und Ursache gemäß Tabelle 5.1	159
5.2.3.12	12. Kombination von Mikroschock-Szenario und Ursache gemäß Tabelle 5.1	160
5.2.4	Herleitung eines praktikablen Grenzwertes	160
5.2.4.1	Bezüge zu bestehenden Regelungen	161
5.3	Prüfung des Grenzwertes zum Schutz vor Mikroschock	162
5.3.1	Ablauf des Prüfverfahrens	163
5.3.2	Mögliche Ergänzungen zum Prüfverfahren	166
5.3.2.1	Zusätzliche Messung von Fehlerströmen	167
5.3.2.2	Zusätzliche Messung der natürlichen Berührungsspannung	167
5.3.3	Bewertung von Aufwand und Nutzen des Prüfverfahrens	167
6	Schlussteil	169
6.1	Ergebnis	169
6.2	Diskussion	170
6.3	Ausblick	172
7	Anhang: Experimentelle Untersuchungen	175
7.1	Variation des Schutzleiters und der Erdung	175
7.1.1	Beschreibung der Aufbauvariationen	175
7.1.2	Messwerte	176
7.1.3	Berechnung der Teilfehlerströme	180
7.1.4	Vergleich von Messung und Modell	180

7.1.5	Interpretation der ermittelten Modellparameter.	181
7.1.5.1	Modellierung der Trenntransformator-Koppelkapazität	181
7.1.5.2	Modellierung der Leitungskapazität	182
7.1.5.3	Modellierung der natürlichen Ableitkapazität	182
7.2	Variation der Leitungslänge und -verlegung	183
7.2.1	Beschreibung der Aufbauvariationen	183
7.2.2	Messwerte	183
7.2.3	Berechnung der Teilströme	183
7.2.3.1	Systemvariation varA.	188
7.2.3.2	Systemvariation varB.	190
7.2.4	Interpretation der ermittelten Modellparameter.	191
7.2.4.1	Modellierung der Trenntransformator-Koppelkapazität	192
7.2.4.2	Modellierung der Leitungskapazität	192
7.2.4.3	Modellierung der natürlichen Ableitkapazität	193
7.3	Variation der Bodenplatte I – Messungen am 12. März 2014	198
7.3.1	Beschreibung der Messvariationen	198
7.3.2	Messwerte	202
7.3.3	Berechnung der Modellparameter	203
7.3.3.1	Berechnung mit dem Standardverfahren	203
7.3.3.2	Spezielle Berechnung für M3.7 bis M3.13	206
7.3.4	Interpretation der ermittelten Modellparameter.	206
7.3.4.1	Nachweis der Unabhängigkeit der max. Berührungsspannung vom Standortwiderstand	207
7.3.4.2	Indirekter Nachweis einer weiteren Spannung in der Leiterschleife.	207
7.4	Variation der Bodenplatte II – Messungen am 27. November 2013	209
7.4.1	Beschreibung der Messvariationen	210
7.4.2	Messwerte	213
7.4.3	Berechnung der Modellparameter	214
7.4.4	Qualität der gewonnenen Daten.	217
7.4.5	Evaluierung der Fehlerabschätzungen.	218
7.5	Variation der Bodenplatte III – Messungen am 13. April 2011	219
7.5.1	Beschreibung der Messvariationen	220
7.5.2	Messwerte	222
7.5.3	Berechnung und Interpretation der Modellparameter	222
7.5.3.1	Berechnung der Spannung U_E bei Abwesenheit eines Isolationsfehlers (oF)	223
7.5.3.2	Berechnung der Spannung U_E in Gegenwart eines Isolationsfehlers (L1/L2).	223
7.5.3.3	Unterschied zwischen einem Isolationsfehler an L1 und L2.	229
7.5.3.4	Unterschiede beim Wechseln der Erdung	229

7.6	Variation der Bodenplatte IV – Zusammenfassung	231
7.6.1	Simulation und Modellfehler für Modell B	231
7.6.1.1	Bestimmung der Spannung U_{PE}	238
7.6.1.2	Bestimmung der Spannung U_{AE}	238
7.6.1.3	Bestimmung der max. Berührungsspannung $U_{b,max}$	238
7.6.1.4	Bestimmung der Spannung U_E	238
7.6.2	Simulation und Modellfehler für Modell A	239
7.6.3	Diskussion der Ergebnisse	239
7.6.3.1	zu Tabelle 7.27, Spalten „Erdung“	239
7.6.3.2	zu Tabelle 7.27, Spalten „Schutzleiter“	240
7.6.3.3	zu Tabelle 7.27, Spalten „Bodenplatte“	241
7.6.3.4	zu Tabelle 7.28, Spalten „Modell A“	242
7.6.3.5	zu Tabelle 7.28, Spalten „Modell B“	242
7.6.4	Fußnoten zu Tabelle 7.27	243
Literatur	247
Tabelle normativer Verweise	251
Stichwortverzeichnis	255