

E9 / A7

Schutzmaßnahmen in elektrischen Anlagen nach DIN VDE 0100

04 / 2025

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

Prof. Dr.-Ing. Ralf- Dieter Rogler

Dipl.-Ing. K. Schellenberger

1. Einleitung

1.1 Ziel des Praktikums

Dieses Praktikum soll den Studierenden verdeutlichen, welche Gefahren von technischem Wechselstrom ausgehen können und welche Strategien und Anwendungsmöglichkeiten es gibt um sich davor zu schützen. Anhand verschiedener Energieversorgungssysteme und Verbraucheranlagen mit unterschiedlichen Erdungssystemen wird im Praktikum die Anwendbarkeit und die Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen und Schutzgeräten untersucht.

1.2 Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen

Schutzmaßnahmen gegen gefährliche Körperströme sind erforderlich, da trotz größter Sorgfalt bei der Errichtung bzw. dem Betrieb elektrischer Anlagen und Geräte Fehler und Defekte nicht auszuschließen sind.

Die in der DIN VDE enthaltenen Regeln entsprechen dem allgemein anerkannten „Stand der Technik“ und werden in regelmäßigen Abständen den gestiegenen Sicherheitsanforderungen und den neuesten technischen Entwicklungen angepasst. Deren Anwendungspflicht ergibt sich aus mehreren Vorschriften und Gesetzen, wie z.B. der Unfallverhütungsvorschrift BGV A3 oder der Betriebssicherheitsverordnung incl. deren technischen Regeln (TRBS). Hersteller, Betreiber und Nutzer von elektrischen Anlagen haben die Pflicht, die Empfehlungen des Deutschen Institutes für Normung (DIN) und des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE) einzuhalten, d.h. für ordnungsgemäße Ausführung und regelmäßige Überprüfung zu sorgen.

Nach /1/ gilt: **„Grundregel des Schutzes gegen elektrischen Schlag ... ist, dass gefährlich aktive Teile nicht berührbar sein dürfen und berührbare leitfähige Teile weder unter normalen Bedingungen noch unter Einzelfehlerbedingungen zu gefährlich aktiven Teilen werden dürfen“.**

1.3 Festlegung von Grenzwerten

Ein Hauptkriterium bei der Festlegung von Grenzwerten in Normen ist die Gewährleistung der Sicherheit des Anwenders.

Ausgehend von der festgestellten Gefährdungskennlinie (Bild 3 sowie /9/, Bild 199) wurde eine für Menschen kurzzeitig maximal zulässige Stromhöhe festgelegt (50 mA bei 50 Hz).

Berücksichtigt man den üblichen ohmschen Widerstand des menschlichen Körpers zwischen einer Hand und den Füßen und die in ungünstiger Umgebung üblichen Übergangswiderstände (zusammen ca. 1000 Ω) erhält man die maximal zulässige Berührungsspannung (50 V).

Daraus wiederum kann der höchstzulässige Erdungs- bzw. Schutzleiterwiderstand der Energieversorgungsanlage und der höchstzulässige Nenn-Auslösestrom einer Abschalteneinrichtung berechnet werden (siehe auch Formeln Seite 8 – 10).

2. Verwendete Formelzeichen

I_a	Abschaltstrom der Schutzeinrichtung
I_F	Fehlerstrom, Strom durch die Fehlerstelle
I_K	Körperstrom, Strom durch den Menschen
I_N	Nennstrom
$I_{\Delta N}$	Bemessungsdifferenzstrom (z.B. einer Schutzeinrichtung)
k	Material- und umgebungsabhängiger Faktor für Schutzleiterquerschnitte
R_A	Erdungswiderstand des Anlagen-Erders
R_B	Widerstand der Betriebserdung (des Energieversorgers)
R_I	Isolationswiderstand
R_K	Widerstand der Fehlerstelle bei Körperschluss
R_L	Widerstand des Außenleiters
R_M	Widerstand des Menschen (Körperwiderstand)
$R_{\ddot{U}}$	Standortübergangswiderstand zum Erdreich
R_V	Widerstand des Verbrauchers
S	Schutzleiterquerschnitt
t	Ansprechzeit, Auslösezeit
U_B	Berührungsspannung
U_F	Fehlervoltage (zwischen Körper des elektr. Betriebsmittels und Bezugserde)
U_L	zulässige Berührungsspannung
U_{LN}	Leiter – Neutralleiter - Spannung
U_N	Netz(nenn)spegnung
U_0	Nennwechsel- oder Nenngleichspannung Außenleiter gegen geerdeten Leiter
RCD	Fehlerstromschutzschalter, FI-Schutzschalter; z.B. $I_{\Delta N} = 30 \text{ mA}$,
L_S	Leitungsschutzschalter
Z_S	"Schleifenimpedanz", Summe der Impedanzen von Außen- und PE-Leiter sowie Innenwiderstand des Stromerzeugers, die bei einem Kurz- oder Körperschluss vom Fehlerstrom durchflossen werden

3. Grundlagenwissen

3.1. Begriffserklärung der Schutzmaßnahmen

Gefährdung: Bei der Nutzung elektrischer Geräte entsteht durch die Empfindlichkeit des menschlichen Körpers gegenüber einem „Elektrischen Schlag“ eine Gefährdung für diesen. Darauf aufbauend wurden Grenzwerte festgelegt, die beim Betrieb elektrischer Anlagen auch im Fall eines Einzelfehlers nicht überschritten werden dürfen (/9/, Bild 58-66).

Zur sicheren Nutzung des elektrischen Stromes müssen mehrere Komponenten betrachtet werden: Die **Energieversorgungsanlage**, die die Energieerzeugung und –Weiterleitung z.B. bis zum Hausanschlusskasten beinhaltet, die **Verbraucheranlage**, die sämtliche fest installierten Leitungen und Sicherheitseinrichtungen beinhaltet, sowie die angeschlossenen **elektrischen Geräte (= elektrische Betriebsmittel)**, die wiederum je nach Bauart und Verwendungszweck bestimmte Schutzkriterien erfüllen müssen.

„Eine Schutzmaßnahme muss bestehen aus:

- einer geeigneten **Kombination zweier unabhängiger Schutzvorkehrungen**, nämlich:
- einer **Basisschutzvorkehrung** (zumeist das Isolieren, Umhüllen oder Abschränken von unter Spannung stehenden Bauteilen)
- und einer **Fehlerschutzvorkehrung**, die bei Versagen (oder einer Umgehung) des Basis-schutzes und bei anderen Fehlern wirksam wird (/1/).

Übliche Maßnahmen zum Schutz des Menschen sind:

- wo immer es möglich ist, Einsatz einer für den Menschen ungefährlichen **Kleinspannung**, sowie eine sichere Trennung von anderen Spannungen (**Schutzklasse 3**). Diese Schutzklasse bietet auch Schutz bei direktem Berühren und macht weitere Maßnahmen unnötig. Jedoch funktioniert das nur bei Anwendungen mit geringem Leistungsbedarf.
- verhindern, dass spannungsführende Teile berührt werden können, z.B. durch eine zweite oder verstärkte **Schutzisolierung (Schutzklasse 2)**, durch isolierende Absperrungen / Umhüllungen (z.B. bei Schaltanlagen) oder durch große Abstände (z.B. von Freileitungen).
- Schutz im Fehlerfall, z.B. durch eine **Schutzerdung** leitfähiger Umhüllungen, durch die (z.B. bei Versagen Leiterisolation) der Kurzschlussstrom fließt, so dass schnell genug eine **Ab-schaltung** erfolgt. Eine Schädigung des Menschen wird verhindert (**Schutzklasse 1**).

Ein **zusätzlicher Schutz** vor einem elektrischen Schlag kann in Verbraucheranlagen in Form von automatischen Abschaltvorrichtungen (FI-Schutzschalter (= **RCD**) mit einem Bemessungsdifferenzstrom $\leq 30 \text{ mA}$, Isolationswächtern, Erdungsüberwachungen, Überspannungsschutz) verwendet werden. In bestimmten Fällen muss ein zusätzlicher **Schutzpotentialausgleich** zur Funktion des Fehlerschutzes bei indirektem Berühren vorgesehen werden.

3.2. Übersicht normgerechter Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag

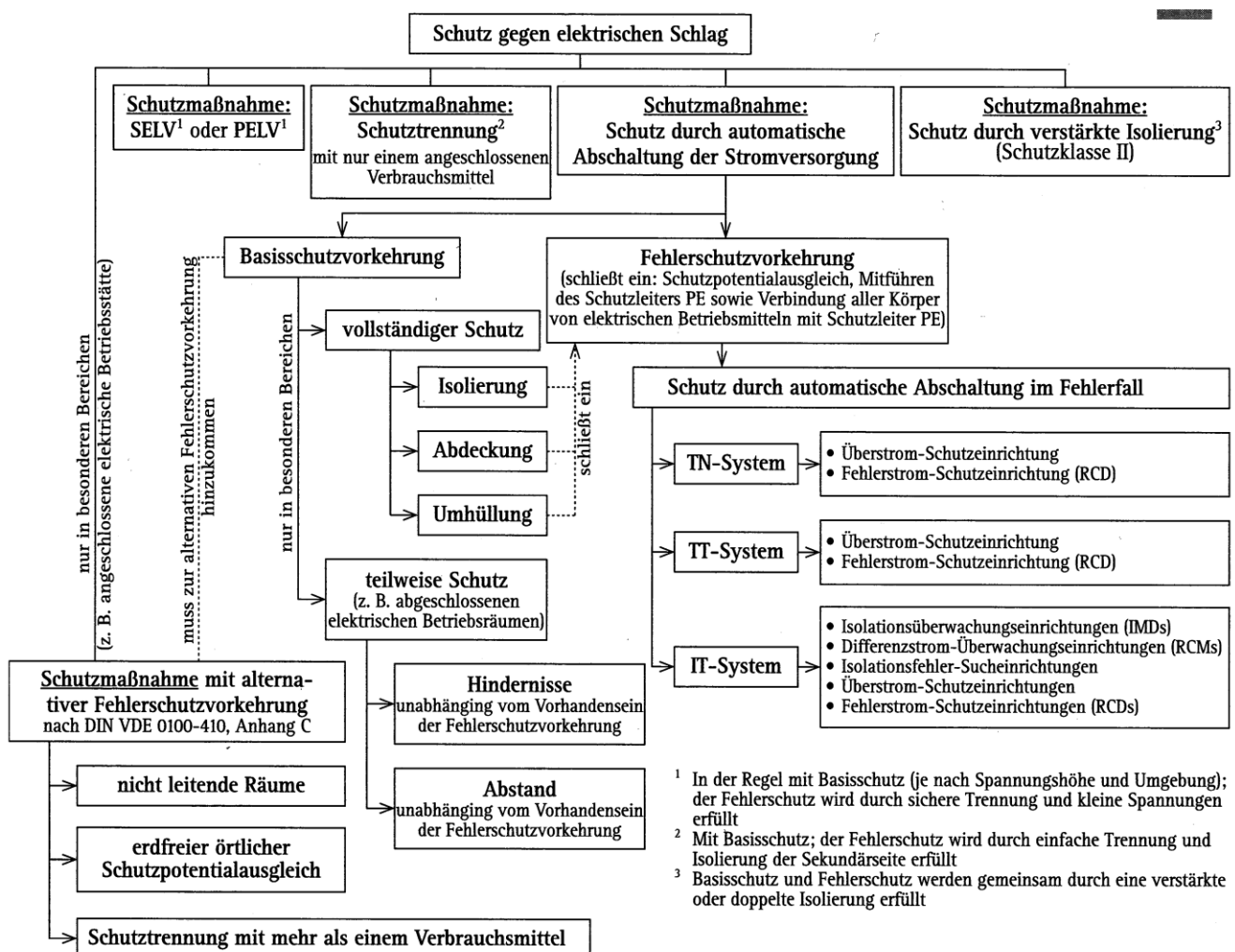


Bild 1: Schutzmaßnahmen nach DIN VDE 0100-410 (aus /7/; S 176)

3.3. Schutzleiter

Der Begriff "**Schutzleiter**" bezeichnet elektrische Leiter, die hauptsächlich zum Zweck der Sicherheit eingebaut werden, z.B. als Schutz gegen elektrischen Schlag. Die Kennzeichnung erfolgt mittels grünelber Isolation über die ganze Länge der Leitung, bei Leitungen sehr großer Querschnitte oder bei Potentialausgleichsleitungen zumindest an den Anschlüssen an beiden Enden und ggf. mit dem Symbol „Schutzerde“ an der Anschlussklemme.

- Der **Schutzerdungsleiter** verbindet zu Schutzzwecken leitfähige Teile eines elektrischen Betriebsmittels mit dem Erdungsleiter der Verbraucheranlage.
- Ein **Erdungsleiter** ist die Verbindung (oder ein Teil davon) zwischen bestimmten Erdungspunkten des Netzes, der Anlage (z.B. Haupterdungsschiene) oder eines Betriebsmittels (Erdungsanschluss) mit dem Erdungssystem.
- Der **Schutzpotentialausgleichsleiter** dient der Verbindung leitfähiger Teile des Gebäudes oder von Installationen mit dem Haupterdungsanschlusspunkt einer Anlage. Ein **zusätzlicher Potentialausgleich** kann zwischen leitfähigen Gehäusen zugleich berührbarer Geräte angebracht werden. Beide verhindern das Auftreten einer zu hohen Spannungsdifferenz zwischen zwei zugleich berührbaren leitfähigen Teilen.

Das **Erdungssystem** umfasst alle fest mit der Umgebung (z.B. dem Erdreich) verbundenen Erdungsbauteile wie Fundament- Ring- und Tiefenerder. Der Erder darf auch bei ungünstigen Umgebungsbedingungen wie Frost oder Trockenheit einen bestimmten Übergangswiderstand zum Erdreich nicht überschreiten.

In den VDE-0100-Normen werden verschiedene **Energieversorgungs- und Verteilungssysteme** nach der **Art der Erdverbindungen** unterschieden, z.B. TN, TT oder IT-Systeme (erster Buchstabe: Art des Betriebserders der Energieversorgungsanlage, zweiter Buchstabe: Art des Anlagenerders der Verbraucheranlage, siehe auch 3.7 – 3.9 sowie /9/, Bilder 50 – 57).

Die Verantwortung für die Erdung liegt entweder beim Besitzer (z.B. beim Hauseigentümer bei Nutzung von TT-Systemen), bei Verwendung eines TN-Systems beim Energieversorger bzw. Netzbetreiber (VDE 0100-540).

3.4. Dimensionierung der Schutzleiter

Der Widerstand eines Schutzleiters muss so klein (d.h. sein Querschnitt groß genug) sein, dass bei einem Erdschluss ein ausreichend hoher Fehlerstrom über den Schutzleiter fließen kann und somit das rechtzeitige Auslösen der Leitungsschutz-Sicherung nicht behindert wird. Außerdem muss ein Schutzleiter allen thermischen und mechanischen Belastungen im zu erwartenden Fehlerfall bis zum Abschalten durch die Schutzeinrichtung standhalten.

Aus diesen Forderungen ergeben sich Mindestquerschnitte für verschiedene Anwendungsfälle, die auch abhängig vom verwendeten Material und den Umgebungsbedingungen sind.

Querschnitt der Außenleiter der Anlage (Faktor k_1 ; S in mm^2)	Mindestquerschnitt des entsprechenden Schutzleiters (Faktor k_2 ; S_P in mm^2)	
	gleicher Werkstoff	anderer Werkstoff
$S \leq 16$	S	$(k_1 / k_2) * S$
$16 < S \leq 35$	16	$(k_1 / k_2) * 16$
$S > 35$	$0,5 * S$	$(k_1 / k_2) * 0,5 * S$

Tabelle 1: Schutzleiterquerschnitt in Abhängigkeit von Außenleitern (nach VDE 0100-540)

Zudem muss er widerstandsfähig gegenüber mechanischen Beanspruchungen sein. Schutzleiter, die nicht Bestandteil eines Kabels oder einer Leitung sind, benötigen ein Mindestquerschnitt von z.B. 16 mm² bei Aluminiumkabel und 4 mm² bei Kupfer bei ungeschützter Verlegung (weitere Werte und Bedingungen siehe VDE 0100-540).

Der **Mindestquerschnitt von Schutzleitern** zur Gewährleistung der geforderten Abschaltzeiten lässt sich bei Zeiten unter 5s durch die folgende Formel berechnen:

$$I_F^2 \cdot t \leq k^2 \cdot S^2$$

- S Schutzleiterquerschnitt in mm²
 I_F Effektivwert des zu erwartenden Fehlerstromes in A
 t Ansprechzeit der Schutzeinrichtung für die aut. Abschaltung in s
 k Material- und umgebungsabhängiger Faktor (VDE 0100-540 Anh. A)

(U₀ = Spannung Außenleiter gegen Erde)

System	120 V < U ₀ < 230 V (I _N < 32 A)		230 V < U ₀ < 400 V (I _N < 32 A)	
	AC	DC	AC	DC
TN	0,4 s	1 s	0,2 s	0,4 s
TT	0,2 s	0,4 s	0,07 s	0,2 s
TT (mit Schutz-PA)	0,4 s	5 s	0,2 s	0,4 s

Tabelle 2: Maximal zulässige Abschaltzeiten (nach VDE 0100-410, Tabelle 41.1)

Wenn ein Schutzleiter gemeinsam für zwei oder mehr Stromkreise verwendet wird, muss die Querschnittsberechnung für die jeweils ungünstigste Bedingung vorgenommen werden. Bei einigen Systemen wie z.B. den TN- Systemen übernehmen die Schutzleiter weitere Funktionen. Es gibt **PEN**-, PEL- und PEM-Leiter, die jeweils die Funktion des Neutral-, Außen- oder Mittelleiters mit übernehmen. Diese dürfen nur in fest installierten elektrischen Anlagen verwendet werden und müssen entsprechend den zusätzlichen Aufgaben größer dimensioniert werden.

3.5. Potentialausgleich

Die VDE 0100-410 fordert in jedem Gebäude mit einer Elektroinstallation einen **Schutzpotentialausgleich** über die **Haupterdungsschiene**. Diese befindet sich an einer zentralen Stelle im Inneren des Gebäudes nahe der Eintrittsstelle der leitfähigen Teile, z.B. im Hausanschlussraum oder -kasten. An diese müssen folgende leitfähigen Teile angeschlossen werden: Haupterdungsleitungen, Potentialausgleichsleitungen, lokales Erdungssystem, sowie über Schutzpotential-Ausgleichsleitungen alle metallenen Teile, die nicht Bestandteil der Elektroinstallation sind, z.B. Rohrleitungssysteme (Wasser, Heizung), und metallene Teile der Gebäudekonstruktion (Bewehrung, Stahlträger).

Nach VDE 0100-410 ist ein **zusätzlicher Schutzpotentialausgleich** insbesondere dort vorzunehmen, wo durch die Umgebungsbedingungen ein erhöhtes Risiko vorliegt, oder die Bedingungen für die schnelle automatische Abschaltung (Tabelle 2) mit dem üblichen Schutzerdungsmaßnahmen nicht erfüllt werden können, sowie im IT- System, wenn Isolationsüberwachungseinrichtungen eingesetzt werden. In diese Maßnahme müssen alle gleichzeitig berührbaren Körper ortsfester Betriebsmittel, alle vorhandenen Schutzleiter und alle fremden, leitfähigen Teile einbezogen werden.

Ein Schutzpotentialausgleichsleiter muss einen Mindestquerschnitt haben (6 mm² CU, 16 mm² AL, 50 mm² Stahl). Es besteht ebenfalls eine Abhängigkeit zum Querschnitt der Außenleiter und eine zum Querschnitt des Schutzerdungsleiters (siehe VDE 0100-540).

Allgemein gilt für den Widerstand des zusätzlichen Potentialausgleichsleiters:

$$R < 50 \text{ V} / I_a \quad (I_a = \text{Auslösestrom, der das Abschalten der Schutzeinrichtung bewirkt})$$

3.6. Schutzeinrichtungen

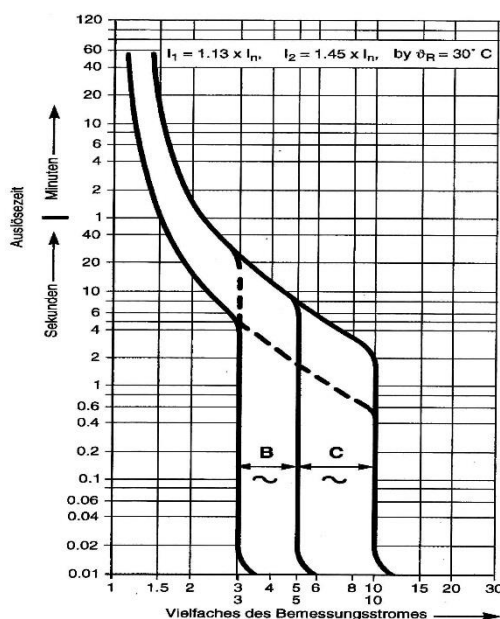
Schutzeinrichtungen dienen sowohl dem Personenschutz als auch dem Anlagenschutz.

Beim **Anlagenschutz** kommt es auf die in Wärme oder mechanische Energie umgewandelte elektrische Leistung an, das heißt, ein zu langes Fließen von **Überstrom** in Form eines zu hohen Maximal- bzw. Dauerstromes oder **Kurzschlussstromes** muss verhindert werden.

Wichtige Kennwerte sind dabei die mechanischen und thermischen Grenzbelastungswerte der verwendeten Materialien. Verwendet werden verschiedene Arten von (Schmelz-) Sicherungen oder Leitungsschutzschaltern, die den fließenden Laststrom bewerten und ggf. direkt den entsprechenden Stromkreis unterbrechen (siehe auch Bild 2).

Zudem muss verhindert werden, dass Fehlerströme, die an einer Fehlerstelle mit einer nennenswerten Impedanz fließen (z.B. bei Körperschluss oder Leiterschluss) durch erhebliche Wärmeentwicklung zu einer örtlichen Überhitzung und nachfolgenden Bränden führen. Hierbei kommen Einrichtungen zum Erkennen von Erdschlüssen, Lichtbögen und Fehlerströmen zum Einsatz, z.B. RCD, die erst bei Fehlerströmen $\leq 300 \text{ mA}$ abschalten.

Leitungsschutzschalter (LS):



Type 3400 0.05...7 A

AC

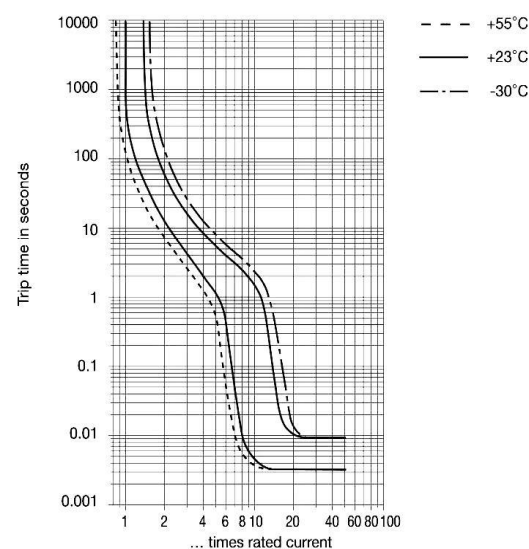


Bild 2: Kennlinien von LS-Sicherungsautomaten (links idealisiert: Typ B/C, / rechts real: Typ 3400)

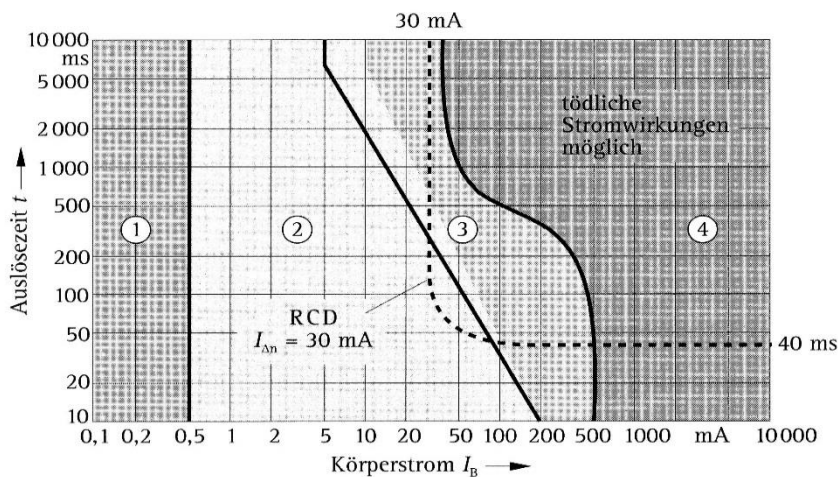
Moderne Leitungsschutz-Schalter bestehen aus zwei Komponenten. Die elektromagnetische Schnellauslösung löst z.B. bei Geräten der B-Charakteristik bei Strömen $> 4 \times I_N$ in weniger als 2 s aus. Bei der thermischen Auslösung ist die Auslösezeit von der Höhe des Überstromes abhängig. Ähnlich wie bei einer Schmelzsicherung wird hier die thermische Überlastbarkeit der angeschlossenen Leitungen und Geräte berücksichtigt. Für die im Praktikum verwendete Geräteschutzsicherung B2 wäre z.B. $I_N = 2 \text{ A}$, d.h. für die Schnellauslösung wäre ein Überstrom von ca. $3 - 5 I_N$ (6 - 10 A) nötig.

Je nach Typ erfolgt die Abschaltung für Ströme zwischen $1,2$ und $10 \cdot I_N$ erst nach mehreren Sekunden bis Minuten. Diese Sicherungen können also zur rechtzeitigen Abschaltung gefährlicher Körperströme durch den Menschen nur dann beitragen, wenn gleichzeitig ein sehr hoher Überstrom I_L fließt.

Fehlerstrom-Schutzschalter (FI, RCD):

Beim **Personenschutz** kommt es darauf an, in sehr kurzer Zeit unabhängig vom fließenden Laststrom auch einen wesentlich kleineren **Fehlerstrom zu erkennen** und unverzüglich den Hauptstromkreis zu unterbrechen. Diese Funktion kann z.B. von einem FI-Schutzschalter erfüllt werden, der so schnell ist, dass er bereits vor Eintritt einer Schädigung des Menschen abschaltet.

Als lebensgefährlich gelten Körperströme > 50 mA (AC), deshalb erfolgt die Abschaltung üblicherweise bei < 30 mA. Ein solcher **FI-Schutzschalter** ist recht genau an die Gefährdungskennlinie angepasst.



Bereiche:

- 1: nicht wahrnehmbar
- 2: wahrnehmbar, ab 10 mA Muskelkrämpfe möglich
- 3: Herzkammerflimmern möglich
- 4: tödliche Auswirkungen möglich

Bild 3: Gefährdungskennlinie des Menschen bei Wechselspannung (50 Hz) mit Auslösekennlinie eines FI-Schutzschalters

Dabei ist die zulässige Abweichung des Auslöse- vom **Nennfehlerstrom** eines FI-Schutzschalters ($0,3 \dots 1,0 \cdot I_{AN}$, also z.B. zwischen 10 und 30 mA) zu beachten. Weitere wichtige Kennwerte eines FI-Schutzschalters sind die **Nennspannung**, der Bemessungsstrom (maximal **zulässiger Dauerstrom**, z.B. 32 A), der maximal abschaltbare **Kurzschlussstrom** (mehrere kA), sowie die vorgesehene **Spannungsform**. Der Stromkreis, in dem der RCD zum Einsatz kommt, muss so dimensioniert werden, dass zum Abschaltzeitpunkt die **maximal zulässige Berührungsspannung U_L** nicht überschritten wird (berechnet aus: $U_L = R_K \cdot I_{Kmax}$, R_K typisch: 1 k Ω , bei AC ist $U_L = 1 \text{ k}\Omega \cdot 50 \text{ mA} = 50 \text{ V}$)

RCD der ersten Generation (Typ AC, nicht mehr zugelassen) funktionierten nur bei Wechselströmen von ca. 50 Hz. Durch den zunehmenden Einsatz von erneuerbaren Energien und von Leistungselektronik in Anlagen und Geräten ist es notwendig, auch pulsierende Wechselströme (Typ A), Ströme höherer Frequenzen (Typ F und B) und Gleichfehlerströme (Typ B) zu erkennen und abzuschalten. Gleichzeitig sollte ein ungewolltes Abschalten beim Hochlaufen oder beim normalen Betrieb der Anlage vermieden werden.

Ein weiteres spannendes Thema ist das Ziel, RCD so selektiv einzusetzen, dass einerseits nur die wirklich betroffenen Anlagenteile abgeschaltet werden, andererseits möglichst ein Reserveschutz (RCD(S) mit Zeitverzögerung) bei Versagen des betroffenen RCD's zur Verfügung steht. In der DIN VDE0100-410 (2018) wird gefordert, dass z.B. bei neu errichteten Anlagen jeder Endstromkreis (mit von Laien zugänglichen Steckdosen bis 32 A) sowie auch Lichtstromkreise mit je einem separaten RCD abzusichern sind. Um dies bei der Installation zu erleichtern, gibt es auch Kombigeräte, in denen z.B. RCD und LS („RCBO“, „RCCB“) in einem Gerät integriert sind.

RCD gelten in TN-Systemen als „Zusätzlicher Schutz“, d.h. sie werden auch bei Versagen von Basis- und Fehlerschutz und bei Mehrfachfehlern wirksam. In TT-Systemen gewährleisten sie den Fehlerschutz.

3.7. Schutzmaßnahmen im TN - System

TN = Erdungssystem „**Terre / Neutre**“ d.h. nur der mit dem Mittel- oder Neutralleiter des Versorgungssystems verbundene N-Leiter des Netzsystems muss direkt mit dem Erdreich verbunden werden (Betriebserder). Eine wichtige Voraussetzung für die Funktion von Schutzmaßnahmen im TN-System ist dessen Zuverlässigkeit und Niederohmigkeit. In /1/ ist seit 2018 neu, dass dieser PEN-Leiter vom Energieversorger an mehreren Punkten mit dem Erdreich verbunden werden muss, um das Risiko eines gebrochenen Leiters zu minimieren.

Die zweite wichtige Voraussetzung ist die sichere Verbindung des PEN-Leiters mit dem Haupterdungspunkt des Gebäudes nahe an der Eintrittsstelle, z.B. im Verbraucheranschlusskasten. Für beides ist der Verteilnetzbetreiber verantwortlich (siehe auch /9/, Bilder 52 - 55). Es ist zulässig und es wurde neu in /1/ aufgenommen, dass jetzt in Deutschland in allen neuen Gebäuden ein normgerechter Fundamenterder errichtet und mit dem Haupterdungspunkt verbunden werden muss, dafür ist der Hausbesitzer verantwortlich. Damit kann bei Erdschluss eines Außenleiters der Spannungsanstieg des Schutzleiters gegen Erde zusätzlich herabgesetzt werden.

TN-S-System

Wenn bereits am Betriebserder des Energieversorgers ein **separater PE-Leiter** angeschlossen und dieser parallel zum N-Leiter bis zum Verbraucheranschluss geführt wird (5-adriges Zuleitungskabel) handelt es sich um ein **TN-S-System** (**S** = "separate").

Der ankommende PE-Leiter wird an die Haupterdungsschiene der Verbraucheranlage angeschlossen. Innerhalb der Verbraucheranlage werden alle „Körper“ (metallische Gehäuse von Verbrauchern) ebenfalls mittels Schutzleitern mit der Haupterdungsschiene verbunden. "N" und "PE" dürfen an **keiner** Stelle der Verbraucheranlage miteinander verbunden sein.

TN-C-System

Wenn die Zuleitung vom Stromversorger nur 4-adrig erfolgt, handelt es sich um ein TN-C-System ("**combined**"), d.h. es wird kein separater PE-Leiter zum Verbraucher geführt, sondern nur ein **PEN-Leiter**. Bei älteren Gebäuden wird dieses System bis zu den Steckdosen und Geräteanschlussstellen zweiadrig weitergeführt und der PEN-Leiter z.B. erst in den Schuko-Steckdosen in PE und N aufgeteilt. (Bild 6.6) Ein Installationsfehler oder Schutzleiterbruch kann unmittelbar zu einer lebensgefährlichen Situation führen. Der Einsatz von RCD ist in diesem System nur eingeschränkt möglich.

TN-C-S-System

Sinnvoller und sicherer ist es, die Aufteilung von PEN in N und PE bereits im Hausanschlusskasten vorzunehmen, dann handelt es sich um ein TN-C-S-System. Es ist wichtig, dass die Aufteilung des PEN-Leiters in PE- und N-Leiter nur an einer definierten Stelle der Verbraucheranlage stattfindet und im weiteren Verlauf keine nochmalige Verbindung zwischen N- und PE-Leiter hergestellt wird. Dieses System ist das in Deutschland am weitesten verbreitete System. (Bild 6.1)

Im **TN** - System sind **Überstrom-Schutzeinrichtungen** zugelassen. Der im Fehlerfall fließende Strom muss das vorgeschaltete Schutzgerät innerhalb der vorgeschriebenen Zeit (Tabelle 2) zum Ausschalten bringen.

Die Kennwerte der Schutzeinrichtungen (I_a) und Stromkreisimpedanzen (Z_s) aller im Fehlerfall möglichen Stromkreise müssen die folgende Anforderung erfüllen:

$$Z_s \cdot I_a \leq U_0$$

Z_s ist hier die Impedanz der Fehlerschleife ("Schleifenimpedanz") und besteht aus:

- dem Innenwiderstand der Stromquelle
- dem Widerstand des betroffenen Außenleiters bis zum Fehlerort
- dem Widerstand des Schutzleiters (PE oder PEN) zwischen Fehlerort und Stromquelle

I_a ist der notwendige Strom, zum Abschalten innerhalb der vorgegebenen Zeit (siehe Tabelle 2);
 U_0 ist die Nennspannung des Außenleiters gegen Erde bzw. den Rückleiter;

Die eher langsamen **Abschaltzeiten** von LS-Sicherungen sind ggf. nicht zur Abwendung von Gefahren bei Mehrfachfehlern und bei indirekter Berührung geeignet. Hierbei muss noch der Einfluss des Widerstandes des Erdungsanschlusses des berührten defekten Gerätes (z.B. lange Zuleitung) und der Übergangswiderstand des Menschen zum Erreich oder zu berührbaren fremden leitfähigen Teilen einbezogen werden. Wenn die mögliche Berührungsspannung U_B die maximal zulässige Spannung U_L übersteigen könnte, muss ein **zusätzlicher Schutzpotentialausgleich** angeschlossen werden.

Die Verwendung von **Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCD)** in TN-Systemen ist nur bei TN-S-Systemen uneingeschränkt möglich. Der RCD dient hier als Zusatzschutz. Der Stromkreis muss zugleich durch eine Überstrom-Sicherung und ggf. einen Potentialausgleich geschützt sein.

In **TN-C-S**-Systemen darf ein RCD nur an Orten installiert werden, wo auf dessen Versorgungsseite PE und N bereits separiert sind.

3.8. Schutzmaßnahmen im TT - System

TT = Erdungssystem „**Terre / Terre**“: Der Null- oder Mittelleiter des Versorgungssystems (**Betriebserder**) wird nur an der Energieversorgungsstation geerdet, jedoch **nicht** mit der Erdung der Verbraucheranlage verbunden.

Der Haupterdungsanschlusspunkt des Verbrauchersystems wird an einen **eigenen „Anlagen-Erder“** angeschlossen, der sich direkt am Standort der Anlage befindet und für den der Hausbesitzer verantwortlich ist. Der Anlagenerder muss regelmäßig überprüft und instandgehalten werden, um auch bei Frost und Trockenheit ausreichend niedrige Werte zu erreichen. Zwischen dem Betriebserder des Energieversorgers und dem Anlagenerder sich hierbei nur das vorhandene Erreich. Dessen Leitfähigkeit ist stark abhängig von den jeweiligen Umgebungsbedingungen.

TT-Systeme werden z.B. für das öffentliche Niederspannungsnetz sowie in Frankreich und in Italien auch für Haushalte genutzt.

Im TT - System sind **Überstromschutzeinrichtungen** zugelassen.

Die Voraussetzung für deren Funktion ist, dass dauerhaft und zuverlässig ein geeigneter niedriger Wert von Z_s sichergestellt werden kann.

Z_s ist hier wie beim TN-System die Impedanz der Fehlerschleife, diese beinhaltet aber statt dem Widerstand des Schutzleiters den viel höheren Erdungswiderstand von Anlagenerder plus Betriebserder. (/9/, Bild 56). Die Berechnung kann analog der beim TN-System erfolgen.

Da in TT-Systemen oft keine ausreichend niederohmige Verbindung zwischen Anlagenerder und Betriebserder des Versorgers erreichbar ist, **müssen** hier als Fehlerschutz zusätzlich **Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCD)** verwendet werden. Für einen wirksamen Personenschutz muss die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$R_A \cdot I_{\Delta N} \leq U_L$$

R_A ... Summe der Widerstände des Erders und des Schutzleiters der Körper in Ω
(Wenn nicht bekannt, darf er durch Z_s ersetzt werden)

$I_{\Delta N}$... Bemessungs**differenz**strom der Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) in A

U_L ... zulässige Berührungsspannung, d.h. 50 V (bei AC)

Der Fehlerschutz (bei indirektem Berühren) ist in diesem Fall auch bei nicht vernachlässigbarer Fehlerimpedanz gegeben.

3.9. Schutzmaßnahmen im IT - System

IT = Erdungssystem „**Isole / Terre**“:

Die wichtigste Voraussetzung ist die Energieversorgung über einen **separaten Transformator** oder über einen eigenen Generator. Dessen Sternpunkt bzw. der Neutralleiter der Sekundärseite darf nicht oder nur über eine ausreichend hohe Impedanz mit dem Erdreich verbunden werden.

Das bewirkt, dass ein Erdschluss oder Körperschluss nicht zum Fließen eines gefährlich hohen Fehlerstromes führen kann und die Anlage deshalb nicht sofort abgeschaltet werden muss. Das System wird z.B. in bestimmten Bereichen von Krankenhäusern oder Industrieanlagen verwendet, in denen eine ungeplante Abschaltung zwingend vermieden werden muss, sowie in Anlagen bei denen eine sichere Erdverbindung nicht möglich ist (z.B. bewegliche Anlagen wie Flugzeuge und E-Fahrzeuge).

Aufbau, Einrichtung und Instandhaltung eines IT-Systems erfordert umfangreiches Fachwissen. Die Anlage muss nach Auftreten eines Isolationsfehlers zum nächstmöglichen Zeitpunkt abgeschaltet und der Fehler gesucht und behoben werden, denn bei Auftreten eines zweiten Fehlers auf einer anderen Leitung ist auch diese Anlage gefährlich und müsste sofort abgeschaltet werden (siehe auch /9/, Bild 57; sowie Unterlagen zum Praktikum E11).

Im IT - System sind Überstrom- und Fehlerstromschutzeinrichtungen, Differenzstrom- und Isolationsüberwachungseinrichtungen und Isolationsfehler-Sucheinrichtungen zugelassen. Überwachungseinrichtungen müssen einen Fehler mittels sicht- und/oder hörbarem Signal deutlich anzeigen solange der Fehler besteht. Der Einsatz von abschaltenden Schutzeinrichtungen wie RCD ist nicht vorgeschrieben, es ist zu beachten, dass diese so installiert werden müssen, dass sie erst beim zweiten Fehler reagieren, und dann möglichst nur die weniger wichtigen Teile abschalten dürfen.

Die Körper der elektrischen Betriebsmittel müssen einzeln oder gruppenweise mit dem Schutzleiter verbunden und geerdet sein. Ähnlich dem TT - System muss die Erdung des Schutzleiters der Bedingung

$$R_A \cdot I_a \leq U_L$$

genügen.

R_A ... Erdungswiderstand des Erders und des Schutzleiters für die Körper in Ω

I_a ... Strom der eine Auslösung der Schutzeinrichtung in der Zeit nach Tabelle1 bewirkt

U_L ... zulässige Berührungsspannung (50 V, AC)

3.10. Schutztrennung

Bei der Schutzmaßnahme "Schutztrennung" wird neben einer Basisisolierung der aktiven Teile der Fehlerschutz erreicht durch einfache Trennung des Stromkreises mit Schutztrennung von anderen Stromkreisen und von Erde. Die Versorgung eines elektrischen Verbrauchsmittels erfolgt also mit einer ungeerdeten Stromquelle. Die aktiven Teile des Stromkreises dürfen an keinem Punkt mit anderen Stromkreisen oder Erde verbunden werden. Die Körper dürfen nicht mit dem Schutzleiter oder mit Körpern anderer Stromkreise oder mit Erde verbunden sein (siehe auch /9/, Bild 97).

3.11. Schutzkleinspannung

Bei diesen Schutzmaßnahmen werden die elektrischen Betriebsmittel mit einer so geringen Spannung betrieben, dass eine direkte Berührung ungefährlich wäre (siehe auch /9/, Bild 82 – 89). Zusätzlich kommt entweder eine Basisisolierung zwischen aktiven Teilen und Erde (SELV) oder eine Erdung von Stromkreisen und Körpern (PELV) zum Einsatz.

3.12. Schutzmaßnahmen bei Geräten

Bei der Entwicklung und Herstellung von Geräten muss je nach erforderlichem Funktionsumfang und geplantem Einsatzzweck eine Schutzklasse und ein zu erreichender Schutzgrad festgelegt werden.

Die **Schutzklasse (I – III)** legt fest, welche Kombination von Basis- und Fehlerschutz (Erdung, Isolation, Spannungshöhe; siehe /9/, Bild 75-78) bei diesem Gerät angewendet wird.

Der **Schutzgrad (IP - x y)** wird entsprechend den erforderlichen Geräteöffnungen für Anschlüsse und Bedienelemente, für die nötige Wärmeabfuhr aus dem Geräteinneren, sowie im Hinblick auf die Umgebungsbedingungen am geplanten Einsatzort (Schutz vor Berührung und dem Eindringen von Fremdkörpern verschiedener Größe und von Wasser verschiedener Intensität) festgelegt (siehe /9/, Bild 79-81).

4 Literatur

- /1/ DIN VDE 0100 – 410 (VDE 0100-410): 2018-10; Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4-41: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag, (IEC 60364-4-41: 2005 + A1:2017, modifiziert),
- /2/ DIN VDE 0100 – 540 (VDE0100-540): 2012-06; (IEC 60364-5-54:2011)
Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 5-54: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Erdungsanlagen und Schutzleiter
- /3/ DIN VDE 0100 – 600 (VDE0100-600): 2017-06; (IEC 60364-6:2016, modifiziert)
Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 6: Prüfungen (HD 60364-6: 2016 + A11:2017)
- /4/ DIN VDE 0701 - 0702 (VDE 0701-0702): 2008-06 (seit 2022 wieder getrennte Normen)
Prüfung und Instandsetzung, Änderung elektrischer Geräte – Wiederholungsprüfung elektrischer Geräte – Allgemeine Anforderungen für die elektrische Sicherheit
- /5/ Hösl, Alfred; Ayx, Roland:
Die neuzeitliche und vorschriftsmäßige Elektroinstallation: Wohnungsbau / Gewerbe / Industrie; 18., neu bearbeitete Auflage.- Heidelberg: Hüthig 2003, Volltext (2019) an der HTW online verfügbar.
- /6/ Rudnik, Siegfried:
Prüfungen der Schutzmaßnahmen: Erstprüfungen nach DIN VDE 0100 Teil 600 u. Wiederholungsprüfungen; Band 63, 2019, Volltext an der HTW online verfügbar.
- /7/ Kiefer, Gerhard:
VDE 0100 und die Praxis; 15. Aufl.- Berlin; Offenbach: VDE - Verlag 2014, Volltext (2017) an der HTW online verfügbar
- /8/ Henning, Wilfried: VDE-Prüfung nach BetrSichV, TRBS und DGUV-Vorschrift 312., überarbeitete Auflage, Band 43, VDE-Verlag Berlin, 2019, Volltext an der HTW online verfügbar
- /9/ Prof. Dr.-Ing. R.-D. Rogler; Vorlesung „Elektrosicherheit“, Bilder 50 – 135

5 Vorbereitungsfragen

- 5.1 Im täglichen Leben gibt es immer wieder neue, für uns unbekannte Dinge oder Situationen, die wir beurteilen müssen, ob davon eine Gefahr für uns ausgeht und wie hoch diese sein könnte. Davon hängt es ab, ob und welche Reaktion notwendig ist, um Schaden abzuwenden. Dabei könnte man diese möglichen Gefahren in 3 grundsätzliche Kategorien unterteilen. Überlegen Sie sich für jede Kategorie einen allgemeinen Namen und für jede eine allgemeine Schutzreaktion.
- 5.2 Beim Umgang mit elektrischen Geräten finden Sie diese drei Kategorien / Strategien in den üblichen Maßnahmen zum Schutz des Menschen vor einem elektrischen Schlag wieder. Ordnen Sie diese den 3 Schutzklassen zu und nennen Sie jeweils ein typisches Merkmal bzw. Bauteil der zugehörigen elektrischen Geräte.
- 5.3 Die Gefährdung von Menschen durch elektrischen Strom hängt besonders von der Stromstärke und der Zeitdauer der Einwirkung ab. Diese wird üblicherweise in 4 Bereiche unterteilt. Nennen Sie die Werte der Bereiche und beschreiben Sie die Auswirkungen in Stichpunkten.
- 5.4 Erklären Sie kurz die Begriffe: aktive Teile, fremde leitfähige Teile, Körper, elektrischer Schlag!
- 5.5 Erklären Sie kurz die folgenden Fehlerarten: Kurzschluss, Leiterschluss, Erdschluss, Körperschluss!
- 5.6 Welche wesentlichen Unterschiede der Erdungssysteme gibt es zwischen den 3 Haupt-Verteilungs-Systemen TN-, TT- und IT-System? Nennen Sie diese und fertigen Sie je eine Skizze für jedes der 3 System an (mit Energieerzeuger, Leitungen, angeschlossenem Verbraucher, Schutzleiter- und Erdungsanschlüssen). Kennzeichnen bzw. ergänzen Sie deutlich alle notwendigen Verbindungen, auch die der Erdungs- und Schutzleiter!
- 5.7 Zeichnen Sie in die Schaltung des TT-Systems (Bild 6.3) den Verlauf aller Stromkreise ein, die sich bei einem Körperschluss bei „b“ bilden (Zeile 2a). (Der Widerstand an der Fehlerstelle sei 0Ω). Berechnen Sie die Berührungsspannung und den Körperstrom für $R_M = 750 \Omega$ und $R_0 = 220 \Omega$ ($R_A = 1 \text{ k}\Omega$, R_B und R_L vernachlässigbar, R_V sei 7000Ω). Die Spannung zwischen L1 und N sei 240 V . Es sei eine 10-A-Sicherung (C-Charakteristik) verbaut. Bewerten Sie die Gefährdung des Modellmenschen.
- 5.8 Erklären Sie kurz, wie ein Leitungs-Schutzschalter funktioniert (2 verschiedene Modi). Was führt letztlich zur Auslösung, also zu Abschaltung? Wovon hängt es ab, wieviel Zeit bis zur Abschaltung vergeht?
- 5.9 Welche weiteren Komponenten der elektrischen Anlage (zusätzlich zu richtiger Größe und Funktionsfähigkeit des LS) könnten dazu führen, dass der LS zu langsam auslöst?
- 5.10 Erklären Sie kurz, wie ein FI-Schutzschalter (RCD) funktioniert. Was führt hier zur Abschaltung? Worin besteht der wesentliche Unterschied zu einem Leitungsschutzschalter?

6 VERSUCHSAUFGABEN

Durchzuführende Tätigkeiten

In diesem Praktikum soll die Wirksamkeit verschiedener Schutzmaßnahmen (Erdung, Überstromschutz, Fehlerstromschutz) getestet werden. Dazu werden Modelle verschiedener Energieverteilungs- bzw. Erdungssysteme (TN-System, TT-System, IT-System) aufgebaut und mit einer „Verbraucheranlage“ verbunden.

Verschiedene Fehler wie Körperschlüsse des Betriebsmittels sowie Unterbrechungen von Schutzleitern können realisiert werden. Es wird untersucht, bei welchen Fehlern welche Schutzeinrichtung wirksam wird. An einem Modellmensen wird gemessen, ob dieser während einer direkten oder indirekten Berührung gefährdet gewesen wäre, und welchen Einfluss weitere Umgebungsbedingungen haben.

Sicherheitsregeln für Praktikumssteilnehmer während der Versuchsdurchführung:

Alle Messungen werden bei realer **Netzspannung (230 V)** durchgeführt! Es dürfen nur unbeschädigte berührungsgeschützte Messkabel verwendet werden. Vor dem Umstecken von Kabeln und Messgeräten sollte die Spannung auf der Netzanschlusseinheit abgeschaltet werden. Ein Wiedereinschalten darf nur nach Freigabe durch den Versuchsleiter erfolgen.

Bei jedem Anzeichen einer Fehlfunktion muss sofort die Spannung abgeschaltet oder der Not-Aus-Taster betätigt und der Laboringenieur informiert werden.

Erforderliche Geräte-Grundausstattung:

Stromversorgung: Netzanschlusseinheit, 230 V / 500 mA, mit Vorsatzplatte TN-C-S-Netz

Steckdose: Schalttafelplatte mit Anschlussbuchsen, PE - Anschluss - Brücke bei „0“

Verbraucher: Schalttafelplatte mit Glühlampe (ca.8 W, mit Vorsatzplatte „Verbraucher 2“)

Mögliche Körperschlüsse: „a“ (R_K sei $0,2 \Omega$) und „b“ (R_K sei 0Ω)

Modellmensch: Schalttafelplatte, Körperwiderstand $R_M = 750 \Omega$ und R_U (220Ω oder $10 \text{ k}\Omega$)

Optional: Platte FI-Schutzschalter ($I_{\Delta N} = 30 \text{ mA}$).

Messgeräte: Schalttafelmessgerät für Netzspannung, 3 Multimeter „Metrahit“ auf Trägerplatten

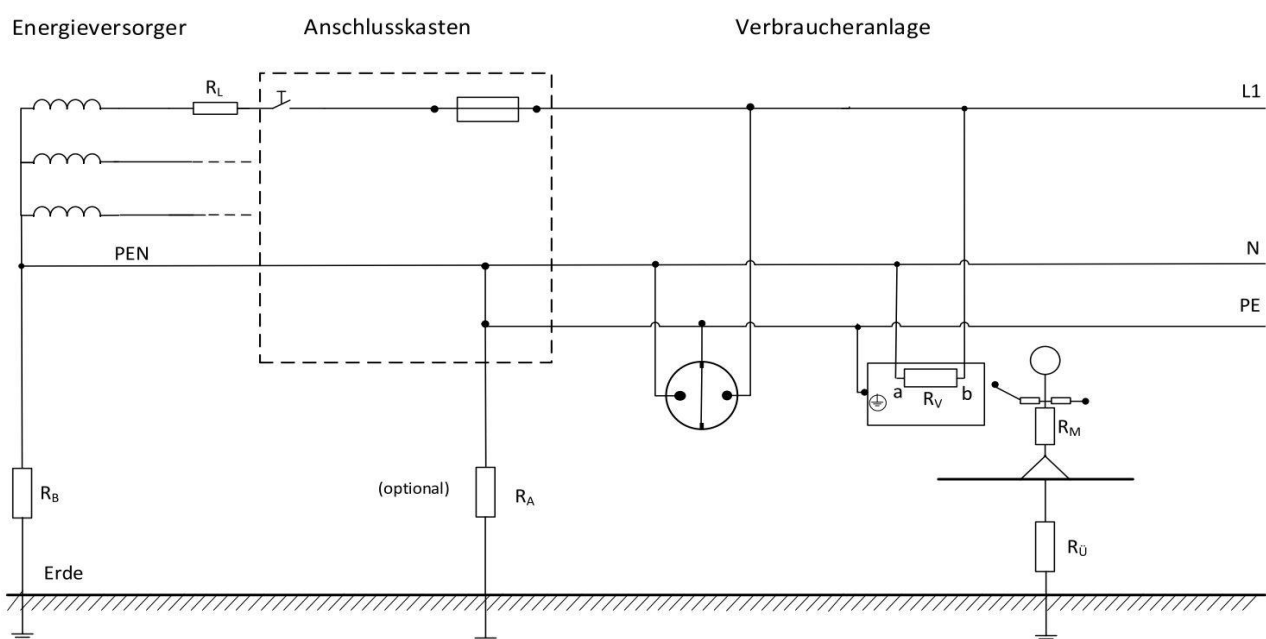


Bild 6.1: Schaltung für ein TN-C-S - System

Inbetriebnahme des Versuchsstandes (T-N-C-S-Netz):

- Kontrolle der Verbindung aller PE- und Erdanschlüsse mit der Netzanschlusseinheit
- Kontrolle des Anschlusses im „Anschlusskasten“ für ein T-N-C-S- Netz
- Kontrolle der Laborkabel-Verbindungen (L1, N) zwischen den Platten
- Kontrolle der Messgeräte für Netzspannung (U_{L1-N}) und Gesamtstrom (I_{L1})
- Anlage einschalten. Prüfen Sie jetzt den fehlerfreien Betrieb der Anlage.
- Verbraucher (Lampe) leuchtet?
- Am Schalttafelinstrument: Ablesen der anliegenden Spannung: V
- Am Multimeter ablesen: Stromverbrauch der Lampe: A

Aufgabe 6.1: Auswirkungen bei direktem Berühren

Eine Grundregel des Schutzes lautet: „gefährlich aktive Teile dürfen nicht berührbar sein“. Nutzen Sie den Modellmenschen zur Erprobung, welche Auswirkungen es hätte, wenn diese berührbar wären.

Schließen Sie zur Beurteilung der möglichen Gefährdung den Modell- Menschen sowie weitere Messgeräte (Multimeter) zur Messung der Berührungsspannung U_B und des Körperstromes I_K an.

Achten Sie bei allen Messgeräten auf die Auswahl des richtigen Messbereiches, auf die richtigen Anschlussbuchsen und auf die richtige Einstellung (z.B. AC oder DC).

Wählen Sie den Betriebserder R_B , den Anlagenerder R_A und den Übergangswiderstand zwischen Modellmensch und Erdreich ($R_{\bar{U}}$) nach Tabelle 6.1 aus.

Verbinden Sie dann die „Hand“ mit dem Leiter.

Lesen Sie die Messwerte zügig ab, und schalten Sie U_N wieder aus. Welchen Weg hat der Strom jeweils genommen? Nutzen Sie ggf. die Stromzange zur Überprüfung.

Notieren Sie, zu welchem Gefährdungsbereich die jeweilige Berührung geführt hätte (siehe Bild 3).

	Fehler	Einstellungen			Auswirkungen			
	direktes Berühren des Leiters	R_B (Ω)	R_A (Ω)	$R_{\bar{U}}$ (Ω)	Gesamtstrom (A)	Berührungsspannung U_B (V)	Körperstrom I_K (mA)	Gefährdungsbereich (1-4)
1	„Hand“ an L1	2,2	∞	10 k				
2	„Hand“ an L1	2,2	∞	220				
3	„Hand“ an N	2,2	∞	220				
	Verändern Sie jetzt den Anschluss des Anlagenerders so, dass ein TT-Netz entsteht. Testen Sie.							
4	„Hand“ an L1	2,2	1 k	220				
	Verändern Sie den Anschluss der Energieversorgung so, dass ein IT-Netz entsteht. Testen Sie.							
5	„Hand“ an L1	∞	1 k	220				

Tabelle 6.1: Messwerte verschiedener Erdungssysteme bei direkter Berührung (ohne RCD)

Erkennen Sie, welchen Weg der Strom jeweils nimmt. Nutzen Sie ggf. die Stromzange.

Warum hat in keinem Fehlerfall die Leitungsschutz-Sicherung ausgelöst?

In welchen Fällen hätte nur der FI-Schutzschalter (RCD) ausgelöst?

In welchem Fall direkter Berührung würde bei jeder Art von Netz weder die Sicherung noch der RCD auslösen und der Mensch wäre in höchstem Maße gefährdet?

Aufgabe 6.2: TN-C-S – System: Indirektes Berühren

Eine weitere Grundregel des Schutzes gegen elektrischen Schlag lautet, dass „berührbare Teile ... unter Einzelfehlerbedingungen nicht zu gefährlich aktiven Teilen werden dürfen“.

Bauen Sie die Netzanschlusseinheit wieder zu einem **TN-C-S**- System um.

Verbinden Sie die „Hand“ des Modellmenschen mit dem „Körper“ (d.h. dem berührbaren, leitfähigen „Gehäuse“) des Gerätes der Schutzklasse I. Führen Sie die erste Testreihe ohne FI-Schutzschalter durch (Tabelle 6.2, letzte Spalte zuerst freilassen).

Hinweis 1: Die **„Körperschluss“**-Steckbrücken (schwarz mit roter Markierung) dürfen immer erst **nach dem Einschalten** am Verbraucher **eingesteckt** werden, und sind nach der Messung unverzüglich wieder zu entfernen. Tragen Sie nur dann Messwerte in Tabelle 6.2 ein, wenn die Sicherung nicht angesprochen hat, ansonsten einen Strich.

Bei „Lampe“ z.B. „geht aus“ notieren.

Hinweis 2: Nach Auslösung des LS (auf der Netzanschlussplatte) steht der schwarz-rote Taster ca. 1,5 cm heraus. Diesen nach Abschalten von U_N und **Entfernung des Fehlers** rückstellen (**vorsichtig** drücken), nach thermischer Auslösung muss er ggf. erst einige Minuten abkühlen!

Lesen Sie die Messwerte zügig ab und entfernen Sie dann unverzüglich den Gerätefehler. Welchen Weg hat der Strom genommen? Unterscheiden Sie zwischen Schutzleiter und Erdungsleiter. Nutzen Sie ggf. die Stromzange zur Überprüfung.

Notieren Sie, zu welchem Gefährdungsbereich die jeweiligen Fehler geführt hätten (siehe Bild 3).

Führen Sie die erste Messreihe **ohne RCD** durch, und lassen Sie die **letzte Spalte vorerst frei**.

Führen Sie danach eine weitere Messreihe mit richtig eingebautem RCD durch.

Testen Sie bei allen Einstellungen bei denen „Gef.“ > 1 war oder die Sicherung ausgelöst hat, ob der RCD auslöst, und ggf. ob dieser schneller auslöst als die Sicherung.

	Fehler		Übergangswiderstände			Lampe an?	Gefährdung			Auslösung	
	Netz	Gerät	R _B (Ω)	R _A (Ω)	R _Ü (Ω)		U _B (V)	I _K (mA)	Gef.	LS	FI
	TN-C-S- Netz fehlerfrei, Abhängigkeit der Messwerte von der Position des Körperschlusses										
1	-	a	2,2	∞	220						
2	-	b	2,2	∞	220						
	Neutralleiter im Anschlusskasten unterbrochen, sowie zusätzlicher Körperschluss										
3	N	-	2,2	∞	220						
4	N	b	2,2	∞	220						
	Schutzleiter im Anschlusskasten unterbrochen; sowie zusätzlicher Körperschluss										
5	PE	-	2,2	∞	220						
6	PE	b	2,2	∞	220						

Tabelle 6.2: Messwerte beim TN-C- S - Systems

Erklären Sie, warum bei unterbrochenem Schutzleiter die LS nicht auslöst, aber der RCD. Nutzen Sie ggf. die Stromzange, entfernen/stecken Sie die Brücke bei $R_{\bar{U}}$.

Zeichnen Sie den FI - Schutzschalter an der richtigen Position im Schaltbild (6.1) ein.

Aufgabe 6.3: TT-System: indirektes Berühren

Bauen Sie die vorhandene Schaltung zu einem TT-Netz-System um (zuerst ohne RCD). Beachten Sie dabei die veränderte Anbindung des Anlagenerders.

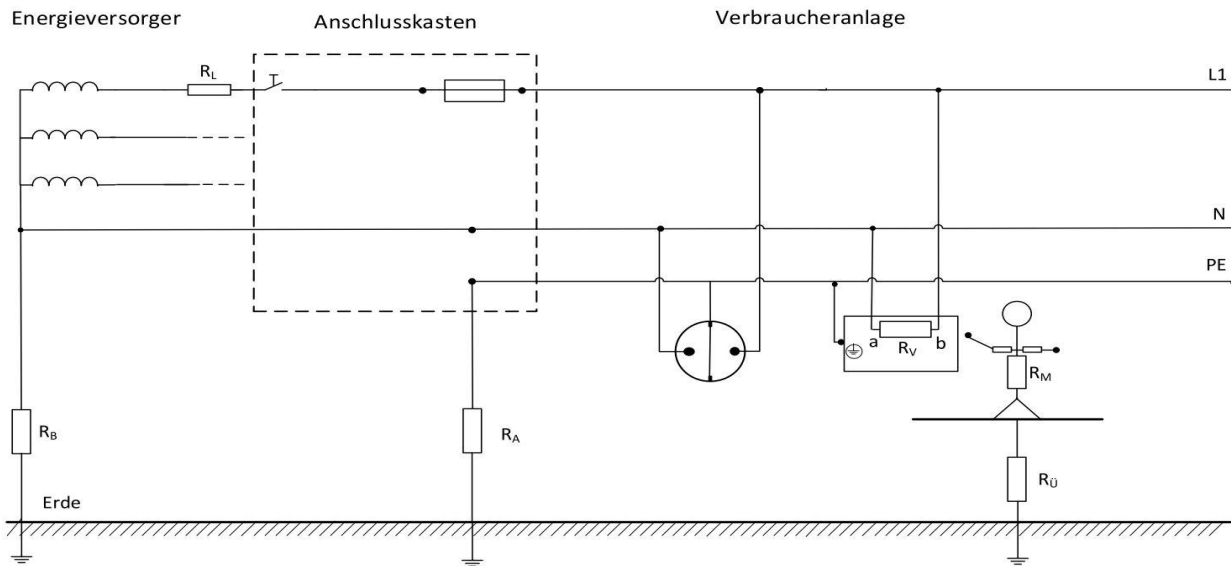


Bild 6.3: Schaltung TT - Netz

Überprüfen Sie dieses Netz bei verschiedenen Einstellungen.

Hinweis: Die Körperschluss-Steckbrücken (bei „a“ oder „b“) wie bei 6.2 immer erst **nach dem Einschalten** stecken! Bei Anzeichen der thermischen Auslösung des "LS" (**Brummen**) den Fehler wieder **entfernen**, bevor Bauteile überhitzen, keine Messwerte erfassen! Der Strom ist hier nicht ausreichend, um den LS schnell auszulösen. Bewerten Sie „LS“ als „zeitverzögert“.

Notieren Sie die Messwerte und verfolgen Sie den Weg des Stroms.

	Fehler		Übergangswiderstände			Lampe an?	Gefährdung			Auslösung	
	Netz	Gerät	R _B (Ω)	R _A (Ω)	R _Ü (Ω)		U _B (V)	I _K (mA)	Gef	LS	FI
	TT-Netz fehlerfrei, Abhängigkeit von der Position des Körperschlusses und vom Anlagenerder										
1	-	a	2,2	1000	220						
2a	-	b	2,2	1000	220						
2b	-	b	2,2	47	220						
	Neutralleiter unterbrochen, sowie zusätzlicher Körperschlusse										
3	N	-	2,2	1000	220						
4	N	b	2,2	1000	220						
	Schutzleiter (PE = R _A) unterbrochen										
5	PE	-	2,2	∞	220						
6	PE	b	2,2	∞	220						

Tabelle 6.3: Messwerte TT-System

Bauen Sie den RCD an der richtigen Position ein. Testen Sie, ob und wie schnell dieser auslöst.

Vergleichen Sie die Ergebnisse von Zeile 2a mit den von Ihnen in Aufgabe 5.7. berechneten Werten.

Vergleichen Sie die Messwerte mit den von Aufgabe 6.2.

Worin unterscheidet sich das TT-System sicherheitstechnisch vom TN-C-S- System? Worauf muss deshalb besonders geachtet werden?

Aufgabe 6.4: Verhalten von Fehlerstrom-Schutzschaltern in einer Anlage

FI-Schutzschalter erhöhen die Sicherheit elektrischer Anlagen maßgeblich, wenn sie normgerecht installiert wurden und fehlerfrei funktionieren. Es gibt es mehrere Möglichkeiten, beides zu testen. Nutzen Sie dafür das bereits aufgebaute **TT-System** mit RCD und für **RA** den **1-k Ω** -Anschluss.

- **Test 1:** Einfacher Funktionstest (ohne weitere Hilfsmittel möglich)

Hinweis: FI-Schutzschalter sollten auch zu Hause regelmäßig getestet werden. Lesen Sie, was auf dem RCD steht.

War der Test erfolgreich? (1. Zeile der Tab. 6.4). **Erklären Sie**, was bei diesem Test im Schalter vorgeht.

- **Test 2:** Feststellung des notwendigen Fehlerstromes zum Auslösen des verwendeten RCD's

Erforderliche Geräte-Zusatzausstattung: Schalttafel-Platte „**FI-Schutzschalter-Auslösung**“ zur Einstellung eines variablen Fehlerstromes, Multimeter zur Bestimmung des erzeugten "Fehlerstromes" (I_f), ggf. Stromzange. Schließen Sie die Platte an das TT-System an.

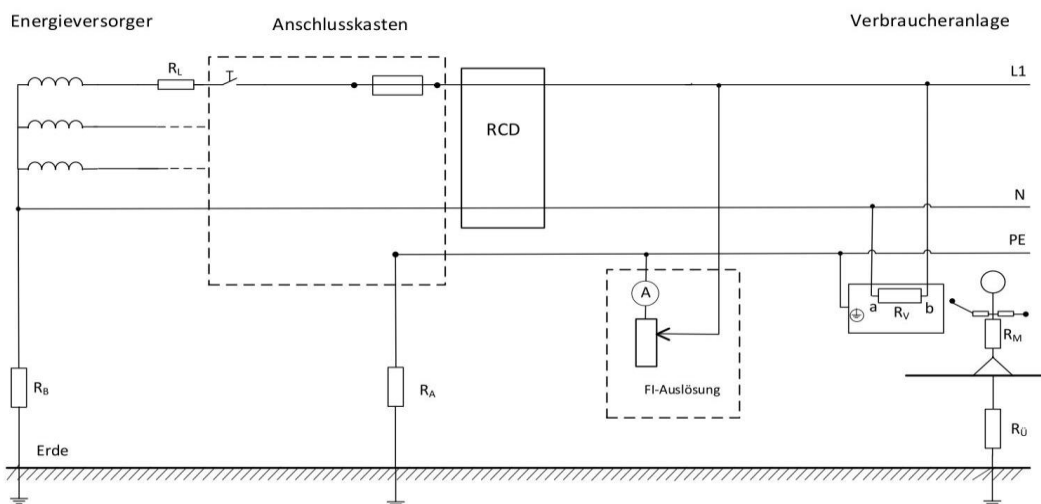


Bild 6.4: Schaltung zum Test des Fehlerstrom-Schutzschalters im TT-System

Bestimmen Sie genau den Fehlerstrom, bei dem dieser FI-Schutzschalter auslöst.

Hinweis: Verbinden Sie mit einer Steckbrücke (d) den Leiter L1 mit dem Einstellwiderstand (der Anschluss mit der Diode bleibt frei). Stellen Sie das Drehpotentiometer vor Messbeginn auf den größtmöglichen Widerstandswert (Rechtsanschlag, 23 k Ω) ein. Schalten Sie die Anlage ein. Stellen Sie das entsprechende Multimeter auf Maximalwerterfassung (Taste Data / Max mehrfach (5 mal) drücken) ein. Erhöhen Sie den Fehlerstrom, indem Sie den Widerstand langsam verkleinern. Rücksetzen der „Max“-Anzeige: 2 mal „AUTO / MAN“ drücken.

Tragen Sie den Messwert in die Tabelle (6.4) ein. Entfernen Sie die FI-Auslöseplatte danach wieder.

- **Test 3:** Feststellung der Auslöse- bzw. Abschaltzeit dieses RCD's

- sowie weiterer Kennwerte (Berührungsspannung, Schleifenimpedanz) der zu schützenden Anlage.

- Schließen Sie das Schutzmaßnahme-Prüfgerät „**PG 0100 N**“ an. **Bewerten Sie** die Messwerte!

getestete Funktion	benutztes „Gerät“	Sollwert / Toleranzbereich	Ergebnis / Messwert	Kommentar
1) Allgemeiner Funktionstest	"Test"-Taster	Abschaltung erfolgt sofort		
2) Messung Auslösestrom in mA	verstellbarer „Isolationswiderstand“			
3) Messung der Auslösezeit in ms	PG 0100 N			
Berührungsspannung vor Ausschalten (max)	PG 0100 N			
Schleifenimpedanz dieser Fehlerschleife	PG 0100 N			

Tabelle 6.4: Messergebnisse zum Test des Fehlerstromschutzschalters

Aufgabe 6.5: Anforderungen an Anlagenerder (R_A) bei einem TT-System

In TT-Systemen kann die Abschaltung nur dann schnell genug erfolgen, wenn ein Anlagenerder R_A vorhanden und ausreichend niederohmig ist. Deshalb muss dieser regelmäßig überprüft werden.

Nutzen Sie das fertig aufgebaute TT-System. Verbinden Sie ein Prüfgerät, z.B.

„PG 0100 N“ mit der „Sonde“ (Schalttafel-Platte) zur Simulation einer Referenz-Erdungssonde.

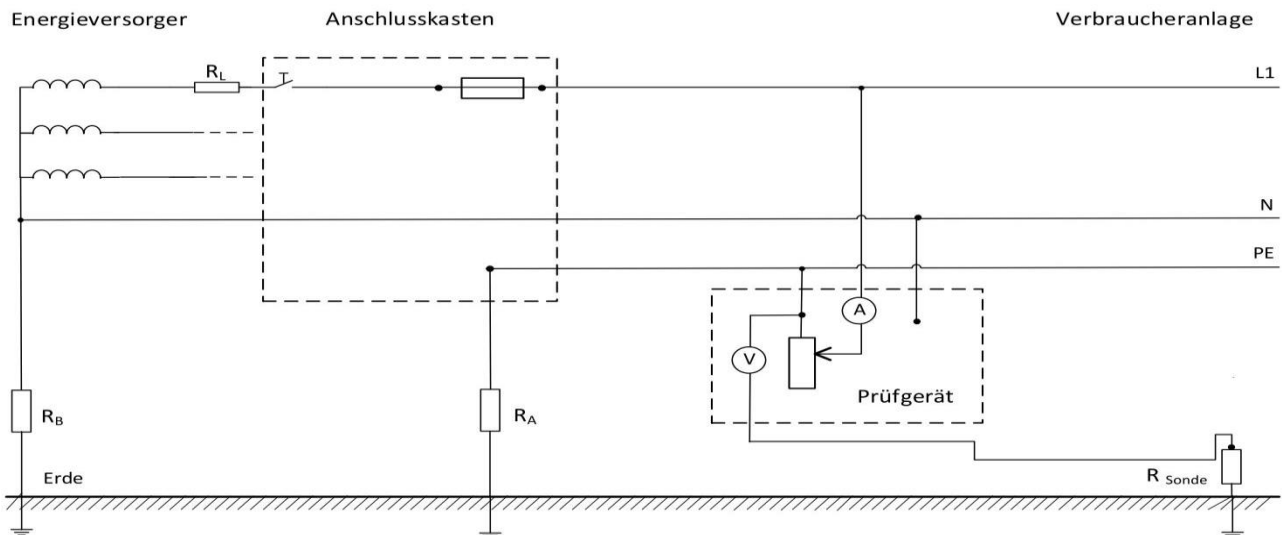


Bild 6.5: Schaltung zur Messung des Anlagenerder-Widerstandes im TT-System

Hinweis: Bei realen Messungen muss eine Erdungssonde im potentialfreien Erdreich installiert werden (Abstand von mindestens 20 m von anderen Erdungssystemen). Im Messgerät **PG 0100N** wird R_A nach dem Strom-Spannungs-Verfahren ermittelt. Das Gerät verwendet die Netzspannung der zu überprüfenden Anlage, um mit dem internen einstellbaren Widerstand einen Stromfluss durch R_A zu erzeugen und zu messen. Zugleich wird mit Hilfe der Sonde der Spannungsabfall über R_A (U_B, zwischen PE und dem Erdpotential) gemessen, und daraus der Wert für R_A berechnet und angezeigt.

Messvorbereitung:

Entfernen Sie die Verbindung des Modellmenschens zum Verbraucher. Verbinden Sie das „Erdreich“ der Platte „Sonde“ mit dem der Schalttafeln.

Wählen Sie mittels Brücken zuerst R_{A (2)} (ca. 1 kΩ), dann R_{A (1)} (ca. 47 Ω) aus.

Nutzen Sie das Messgerät **PG 0100N**. Wählen Sie einen passenden Messbereich (R_E). Nutzen Sie ggf. die ausliegende Gerätebeschreibung.

Anlagenerder	R _{A (2)} =	Ω	R _{A (1)} =	Ω
---------------------	----------------------	---	----------------------	---

Die mögliche zulässige Berührungsspannung U_B muss nach der Bedingung für TT-Netze kleiner sein als U_{L max}.

$$U_B = R_A \cdot I_a \quad (I_a = \text{Strom bei dem die Schutzeinrichtung schnell genug abschaltet})$$

Tragen Sie die Werte in Tabelle 6.5. ein. **Berechnen Sie**, welcher Widerstand des Anlagenerders mit welchen Schutzgeräten unserer Modellanlage kombiniert werden dürfte, um die Bedingung zu erfüllen.

Letzte Zeile: **Berechnen Sie** den maximal zulässigen R_{A grenz} einer realen kleinen Anlage.

Schutz-Gerät	Notwendiger Abschaltstrom I _a bzw. Nennwert I _{ΔN}	Messwert R _E = R _A in Ω	berechnet: U _B in V	Bedingung erfüllt? Ja / nein
LS-Sicherung		R _{A (2)} =		
LS-Sicherung		R _{A (1)} =		
RCD Sollwert		R _{A (2)} =		
Grenzwert R _A	I _a = 16 A (B16)	R _{A grenz} =	U _L = U _B = 50 V	grenzwertig

Tabelle 6.5: Überprüfung der Einhaltung der zulässigen Berührungsspannung

Aufgabe 6.6: TN-C - System (optional)

Entfernen Sie den RCD und das PG 0100 aus der Schaltung. Bauen Sie die vorhandene Schaltung zu einem TN-C-System um (andere Vorsatzplatte an der Netzanschlusseinheit). Beachten Sie dabei die veränderte Anbindung des PE-Leiters und der „Steckdose“. Überprüfen Sie die Sicherheit dieses Netzes bei verschiedenen Einstellungen.

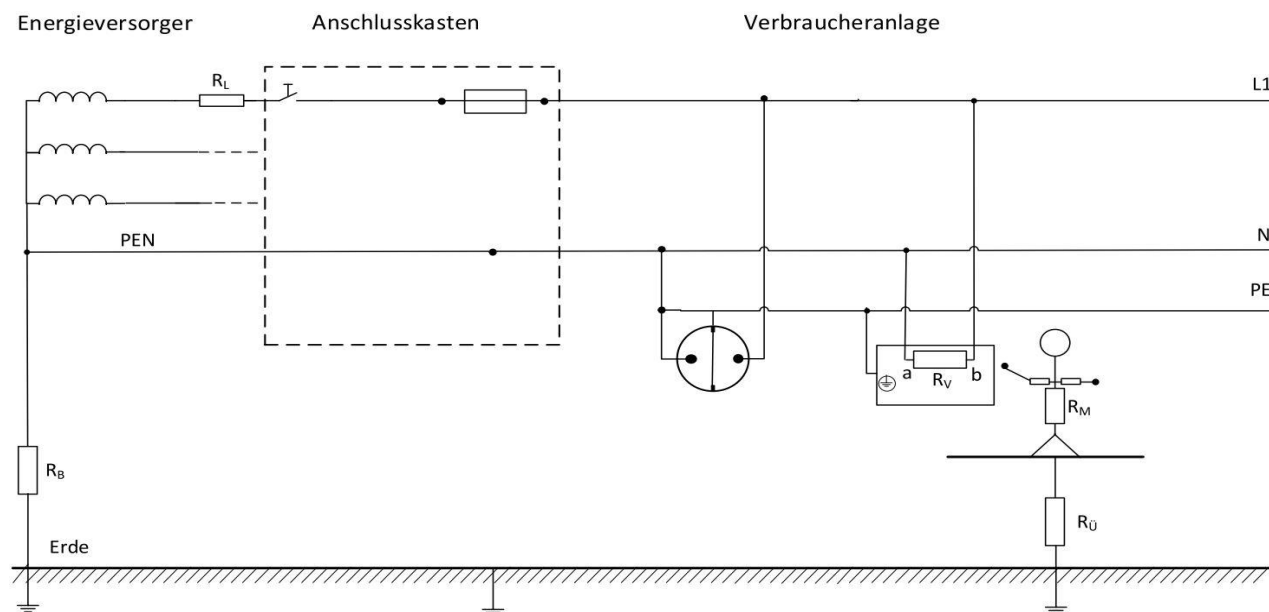


Bild 6.6: Schaltung für ein TN-C System

Prüfen Sie das Verhalten bei Gerätefehlern und bei Fehlern der Zuleitungen. Notieren Sie wie zuvor die Messwerte und verfolgen Sie den Weg des Stromes. Bauen Sie, wenn sinnvoll, einen FI-Schutzschalter ein, vermerken Sie die Position in Bild 6.6 und prüfen Sie erneut.

	Fehler		Übergangswiderstände			Lampe an?	Gefährdungen			Auslösung	
	Netz	Gerät	R _B (Ω)	R _A (Ω)	R _Ü (Ω)		U _B (V)	I _K (mA)	Gef.	LS	FI
	Netzanschluss fehlerfrei, in Abhängigkeit von der Position des Körperschlusses										
1	-	a	2,2	∞	220						
2	-	b	2,2	∞	220						
	PEN der Hauszuleitung unterbrochen sowie zusätzlicher Körperschluss										
3	PEN	-	2,2	∞	220						
4	PEN	b	2,2	∞	220						
	L1 und PEN im Anschlusskasten vertauscht, ohne Körperschluss										
5	<-> : L1-PEN	-	2,2	∞	220						

Tabelle 6.6: Messwerte für ein TN-C - System

Sollte der RCD nicht wie erwartet funktionieren, überlegen Sie, wie das Problem gelöst werden könnte, um die Gefährdung des Menschen zu vermindern. Testen Sie ggf. eine andere Position und korrigieren Sie Ihre Zeichnung. Markieren Sie ggf. verbleibende Gefährdungen.

Nennen Sie einen Vorteil und zwei Nachteile des TN-C Systems!

Abschlussfragen:

1. Welche Bestandteile einer elektrischen Anlage mit welchen Eigenschaften sind zusätzlich zum funktionellen Aufbau notwendig, um diese sicher betreiben zu können?
2. Welche zwei Aufgaben haben Schutzleiter?
3. Nennen Sie den Zusammenhang zwischen der Dimensionierung einer Leitungsschutzsicherung und der Dimensionierung des Schutzleiters!

Hinweise zur Erstellung des Protokolls:

Fertigen Sie das Protokoll als wissenschaftliche Arbeit an, in der Sie Ihr Experiment so darstellen, dass eine andere Person dieses in kurzer Zeit nachvollziehen und von Ihren Erkenntnissen profitieren kann.

Das Protokoll muss enthalten:

- ein vollständig ausgefülltes Muster-Deckblatt oder ein eigenes mit Titel, Versuchsthema, Datum, Ort, Name und Signum des Protokollführers, der Teilnehmer und des Versuchsleiters.
- eine kurze eigene Einleitung zum Ziel des Praktikums
- pro Teilaufgabe eine Skizze des Versuchsaufbaus, der verwendeten Geräte und Messinstrumente, ggf. der Umgebungsbedingungen, sowie Notizen zum Versuchsablauf
- die Mess- bzw. Rechenergebnisse als Diagramme oder Tabellen, ggf. Einzelergebnisse mit entsprechenden Anmerkungen, z.B. ob normgerecht oder nicht
- die Bewertung von Messablauf und Messergebnissen (z. B. quantitative Begründung von Kurvenverläufen, auffällige Einzelwerte, Nennung möglicher Ursachen für Unterschiede zwischen Theorie und Messung, quantitative Messfehlerdiskussion, qualitative Einordnung)
- Ihre Erkenntnisse für jeden Teilversuch. Orientieren Sie sich dabei ggf. an den gestellten Fragen! Jede Frage sollte mit einem, höchstens 2 Sätzen beantwortet werden!
- das Ergebnis des Praktikums, was Sie daraus für sich entnehmen konnten, wo Sie noch Verbesserungsbedarf sehen. Orientieren Sie sich dabei auch an den Abschlussfragen.
- Ggf. Quellenangaben

Achten Sie darauf, alles in kurzen Sätzen zu formulieren und konzentrieren Sie sich auf das Wesentliche. Das Kopieren oder Abschreiben von langen Texten ist hier nicht erwünscht.