

Versuchsanleitung Fachpraktikum HS5

Berührungsschutz und Gefahren durch Körperströme

Labor: ETL C11
Zeit: 13:30 bis 16:30



Übersicht

Ziel dieses Praktikums ist das Erlernen der verschiedenen Realisierungsarten von Niederspannungsnetzen sowie deren Gefahrenpotential und Schutzmassnahmen gegen hohe Berührungsspannungen bei Kurzschlüssen und Leiterunterbrechungen. Anhand der Praktikumsanordnung können zahlreiche Fehler konstruiert werden und deren mögliche Erkennung und Abschaltung durch Sicherungen und diverse FI-Schalter untersucht werden. Bei ausbleibender Fehler-Unterbrechung kann die Berührungsspannung analysiert und der zu erwartende Körperstrom durch den Menschen ermittelt werden.

Mittels einer Fehlerstromsimulators können die Studenten die Gefahr der Loslass-Schwelle durch eintretende Handverkrampfung sowie das Schmerzempfinden bereits bei geringen, für den Menschen ungefährlichen Stromhöhen erfahren.



Voraussetzung für die Zulassung zum Fachpraktikum HS5 ist das Durchlesen der Versuchsanleitung, das Lösen der Vorbereitungsaufgaben und insbesondere das Studium der Sicherheitshinweise im Anhang.

Inhaltsverzeichnis

I	Einleitung	3
1	Hintergründe und Folgen von Elektrounfällen	3
2	Körperströme und Schutzmassnahmen	5
II	Direkter und indirekter Schutz	8
3	Basisschutz gegen direktes Berühren	8
4	Fehlerschutz gegen indirektes Berühren	10
4.1	Schutz durch Abschaltung	10
4.2	Schutz ohne Abschaltung	13
5	Schutz durch Kleinspannung	16
6	Prüfung vor Schutzanlagen	17
III	Erdung in der Niederspannung	18
7	IT-Netz	18
8	TT-Netz	19
9	TN-Netze	20
IV	Versuchsdurchführung	21
1	Vorbereitende Aufgaben - Bitte vor dem Versuch lösen	22
2	Versuch 1 - TN-S Netz	23
3	Versuch 2 - TN-C Netz und Potentialausgleich	26
4	Versuch 3 - Andere Stromnetze	31
5	Versuch 4 - Ausschaltvermögen von RCD	33
6	Versuch 5 - Fehlerströme in der Hand (opt.)	35

Teil I

Einleitung

1 Hintergründe und Folgen von Elektrounfällen

„Elektrische Unfälle passieren nicht - sie werden gemacht.“ [1]

Gemäss dem aktuellen Bericht des eidgenössischen Starkstrominspektorats (ESTI) hat die Zahl der gemeldeten Elektrounfälle in den letzten zehn Jahren kontinuierlich zugenommen und scheint sich auf hohem Niveau zu stabilisieren. Hierbei fällt der überwiegende Anteil von Unfällen bei Elektrofachleuten auf (Abbildung 1). Insbesondere bei den tödlichen Unfällen ereigneten sich fünf von sieben im beruflichen Umfeld [2].

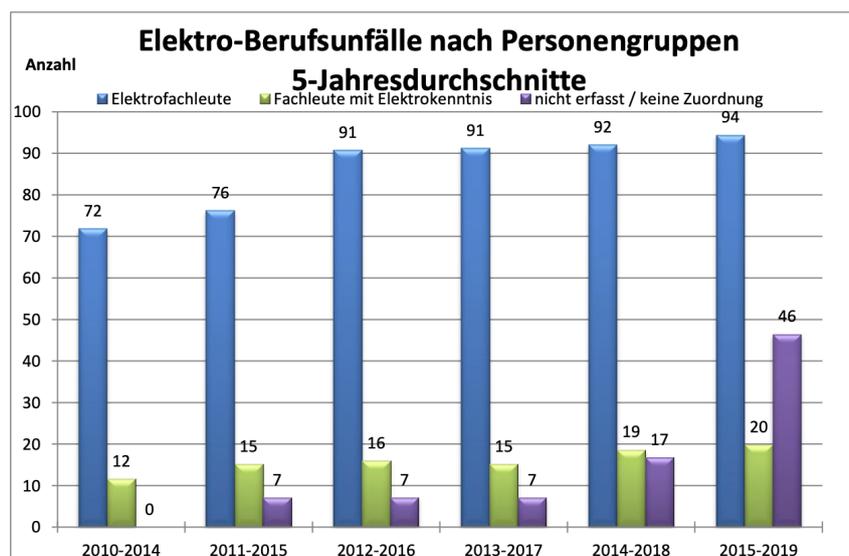


Abbildung 1: Entwicklung der Starkstromunfälle in der Schweiz [2]

Zwar sind viele der Unfälle auf häufigere Bagatellunfälle in der Niederspannung zurückzuführen, jedoch verbleiben auch die gefährlicheren Hochspannungsunfälle auf hohem Niveau [2]. Die Ursachen solcher Vorkommnisse sind vielfältig, jedoch werden gerade von Elektroinstallateuren und Ingenieuren die möglichen Folgen meist unterschätzt und vermeintlich sichere Operationen unter Spannung durchgeführt. Bei vielen sicherheitswidrigen Handlungen werden besonders häufig die fünf Sicherheitsregeln missachtet (siehe Abbildung 2).

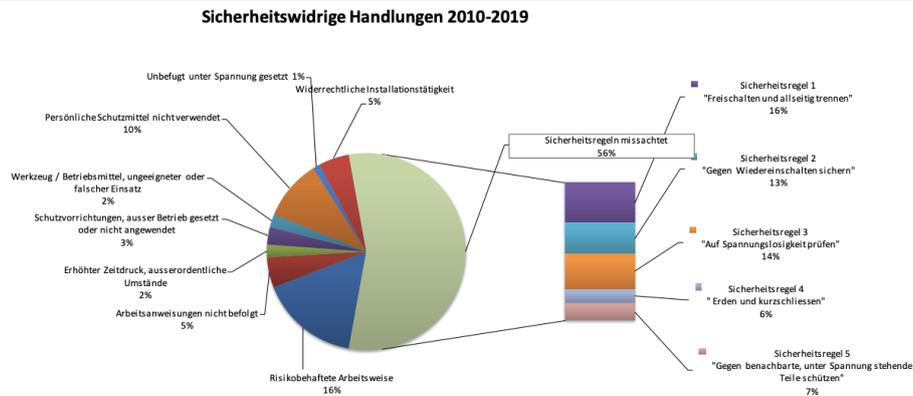


Abbildung 2: Sicherheitswidrige Handlungen als Hintergrund von Elektrounfällen [2]

Viele dieser Risiken lassen sich durch sachgerechtes Arbeiten an elektrischen Anlagen bei Beachten der folgenden Regeln vermeiden [3]:

- Anlage freischalten und von der Versorgung trennen
- Gegen Wiedereinschalten sichern
- Spannungsfreiheit prüfen
- Erden und kurzschliessen
- Benachbarte aktive Teile abschränken

Für den Fall, dass trotz ordnungsgemässen Arbeiten Gefahren auftreten, existieren zahlreiche Schutzmassnahmen, um den Menschen vor Körperströmen zu schützen, deren Einteilung in Abschnitt 2 dargestellt wird.

2 Körperströme und Schutzmassnahmen

Die entscheidenden Faktoren beim Kontakt mit spannungsführenden Teilen sind die durch den Spannungsabfall über dem Körperwiderstand auftretenden Körperströme sowie insbesondere deren zeitliche Begrenzung. Grundsätzlich wird gemäss Abbildung 3 zwischen vier Bereichen unterschieden.

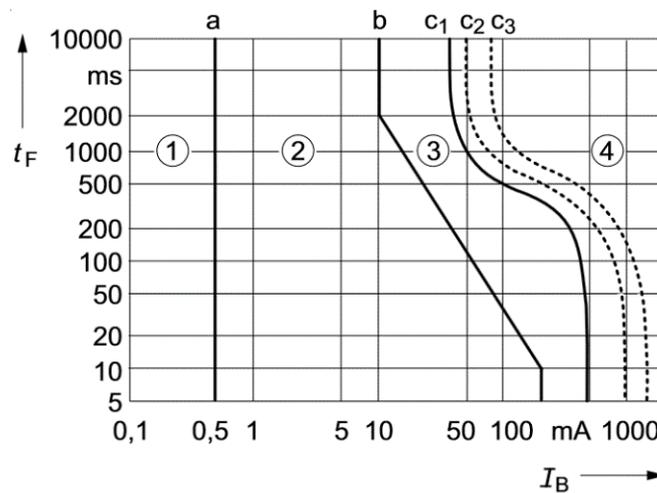


Abbildung 3: Gefährdung durch Einteilung und Folgen von Körperströmen [4]

Bis zu einer Stromstärke von 0.5 mA (Bereich 1 - Wahrnehmbarkeitsschwelle) ist keine Reaktion erkennbar und der Strom für den Menschen medizinisch unbedenklich. Im Bereich 2 wird der Strom als ein leichtes Kribbeln („Ameisenlaufen“) wahrgenommen und es kommt bei grösseren Strömen bereits zu leichten Muskelkrämpfen. Oberhalb der Loslass-Schwelle in Bereich 3 kann der berührte spannungsführende Gegenstand nicht mehr losgelassen werden und es kommt zu Muskelverkrampfungen, Atemproblemen und Herzrhythmusstörungen. Es entstehen jedoch für gewöhnlich keine dauerhaften organischen Schäden. Im Bereich 4 ist mit je nach Wahrscheinlichkeit (c_1 bis c_3) eine tödliche Stromwirkung sehr wahrscheinlich. In diesem Bereich wird die periodische Kontraktion der Herzkammerwände erheblich gestört, sodass durch das sogenannte Herzkammerflimmern der Blutkreislauf zusammenbrechen kann. Durch die unterbrochene Durchblutung sind schwere Hirnschäden kaum vermeidbar [4]. Des Weiteren können bei höheren Stromstärken auch starke Verbrennungen bis zu vierten Grades entstehen, als deren Folge eine starke Überlastung der Nieren ebenfalls zum Tod führen kann. Zuletzt kann auch bei längerer Einwirkdauer das Blut elektrolytisch zersetzt werden und starke Vergiftungserscheinungen hervorrufen [5].

Massgeblich für den abgeführten Körperstrom ist der Körperwiderstand des Menschen, der jedoch von zahlreichen Faktoren wie Strompfad, Hautfeuchtigkeit, Berührungsfläche und Frequenz der Spannung abhängt. Im schlimmsten Fall lässt sich dieser von Hand bis Fuss mit $1\text{ k}\Omega$ abschätzen und nimmt mit kleinerer Berührfläche und steigender Frequenz bedingt durch den Skin-Effekt zu, sodass der Strom reduziert wird.

Zusätzlich wird der Strom durch die Serie von Leiter- und Fehlerwiderstand, Übergangswiderstände an Hand und Fuss, sowie den Widerstand zwischen Nullpunkterder und Sternpunkt begrenzt (vgl. Abbildung 4). Bezüglich des Strompfades im Körper sind Längsströmungen von Hand zu Fuss aufgrund der Nähe zum Herzen deutlich kritischer als Querströmungen von Hand zu Hand [1].

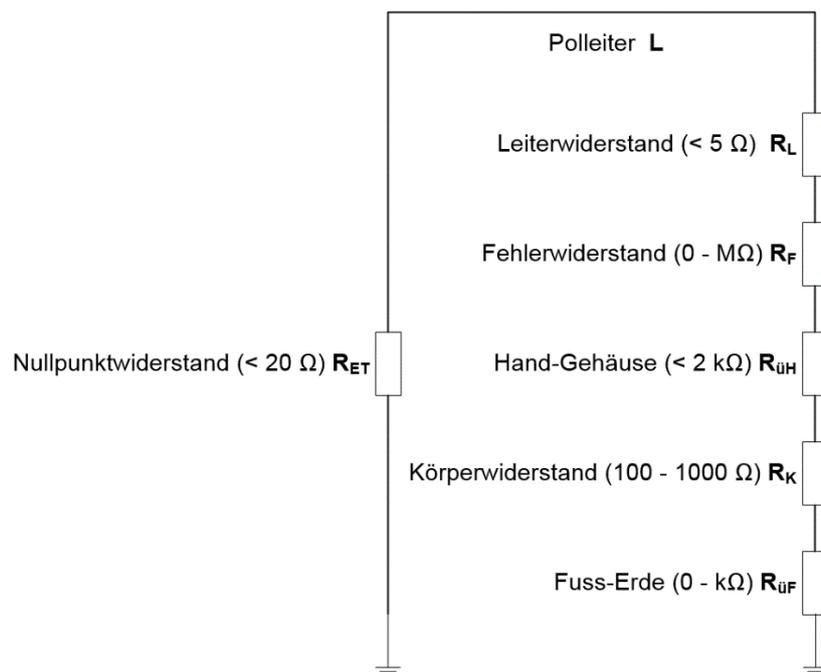


Abbildung 4: Beteiligte Widerstände bei Körperschluss, frei nach [1]

Bezüglich der Spannungsform und -höhe ist auch zwischen verschiedenen Unfallarten zu unterscheiden. So ist die Einwirkdauer bei Niederspannungs-Unfällen meist bedeutend höher, da bei Hochspannung Opfer häufig weggeschleudert werden und somit vom Stromkreis getrennt werden. Gleichzeitig bedeuten jedoch die wesentlich höheren Ströme und Verbrennungen durch den Lichtbogen bei Hochspannung eine wesentlich grössere Gefahr.

Bei Gleichstrom treten die typischen Symptome erst bei etwa dreifacher Stromstärke auf und durch die fehlende Wechselstromkomponente tritt keine Loslass-Schwelle auf. Erfahrungsgemäss sind hier positive Spannungen mit Stromfluss in Erdrichtung kritischer als Unfälle bei negativer Polarität. Entsprechend ihrer Ähnlichkeit zur Wechselspannung steigt die Gefahr mit der Welligkeit der Spannung [1].

Um solche Folgen zu vermeiden gilt es eine direkte Berührung aktiver Teile unmöglich zu machen (Basisschutz) sowie im Fehlerfall die Stromhöhe und deren Einwirkdauer stark zu begrenzen (Fehlerschutz). Gemeinsam mit dem Zusatzschutz werden diese Massnahmen in drei Schutzebenen (Abbildung 5 (a)) eingeteilt.



Abbildung 5: Schutzebenen (a) und Schutzklassen (b) [6]

Neben den Schutzebenen dienen Schutzklassen zur Einteilung von elektrischen Betriebsmitteln (Abbildung 5 (b)) sowie Schutzarten zur Kennzeichnung der Eignung elektrischer Anlagen für verschiedene Umgebungsbedingungen.

Während in Schutzklasse I dem Symbol entsprechend Gehäuse von Betriebsmitteln zu erden sind, werden Geräte der Schutzklasse II mit einer Basisisolation ummantelt und nicht geerdet. Schutzklasse III sieht eine Spannungsbegrenzung auf die sogenannten Kleinspannungen vor, auf die in Abschnitt 5 eingegangen wird [7].

Mittels der Schutzarten wird zusätzlich für die Basisisolation deren Beständigkeit gegen das Eindringen von Fremdkörpern und Flüssigkeiten nach [8] definiert, wie es beispielsweise aus der Klassifizierung robuster Mobiltelefone bekannt ist. Die Kennzeichnung erfolgt hinter der Kennung IP (international protection) durch zwei Kennziffern für die Güte bei Fremdkörperschutz (z.B. Staub) von 0 bis 6 sowie für Wasserschutz von 0 bis 8.

Teil II

Direkter und indirekter Schutz

3 Basisschutz gegen direktes Berühren

Wie in Abschnitt 2 eingeleitet, wird zwischen Basis- und Fehlerschutz unterschieden, wobei Ersterer darauf ausgelegt ist ein direktes Berühren der spannungsführenden Teile zu vermeiden, daher auch häufig direkter Berührungsschutz wie in Abbildung 6 (1).

Durch das Auftreten eines Kurzschlusses kann jedoch auch z.B. das Potential des Gehäuses eines Betriebsmittels auf Spannung angehoben werden und somit auch ein vermeintlich sicheres Element bei Berührung Körperströme verursachen. Um auch in diesem Fall den Mensch zu schützen ist eine Begrenzung der Stromeinwirkung auf den Menschen notwendig. Die hierzu gehörenden Schutzmassnahmen werden daher als Fehlerschutz, oder auch indirekter Berührungsschutz bezeichnet, da kein direkter Kontakt zum eigentlichen Leiter auftritt (siehe Abbildung 6 (2)).

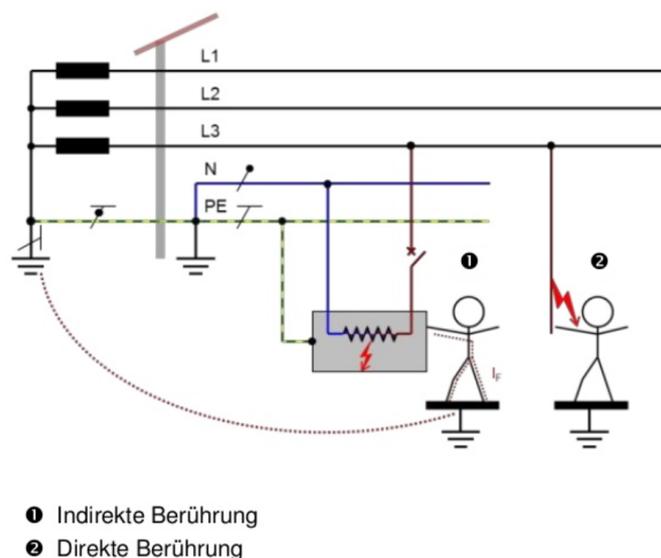


Abbildung 6: Indirekte (1) und direkte Berührung (2) [9]

Um einen direkten Kontakt zum Leiter zu vermeiden, existieren vier Schutzmassnahmen:

- Isolierung der spannungsführenden Leiter
- Abdeckung bzw. Umhüllung aktiver Teile
- Schutz durch Hindernisse
- Kontaktvermeidung durch Abstände

Im Haushalt müssen beispielsweise alle aktiven Teile und Leitungen elektrisch und mechanisch widerstandsfähig isoliert werden, sodass nur bei Zerstörung der Schutz unterbrochen wird. Bei einem gewöhnlichen Haushaltsfön dient, wie in Abbildung 7 eine Plastikabdeckung zur Vermeidung direkten Kontaktes, wobei die benötigte Öffnung zur Luftzirkulation eine bekannte Schwachstelle darstellt. Auch durch grosse Abstände wie z.B. bei Freiluftisolation ist ein Ausschluss von direktem Berühren gewährleistet. In Bereichen für elektrisches Fachpersonal ist zudem der Schutz durch Hindernisse wie etwa Gitter sowie durch Abstand beispielsweise auf Schaltfeldern zulässig [6].

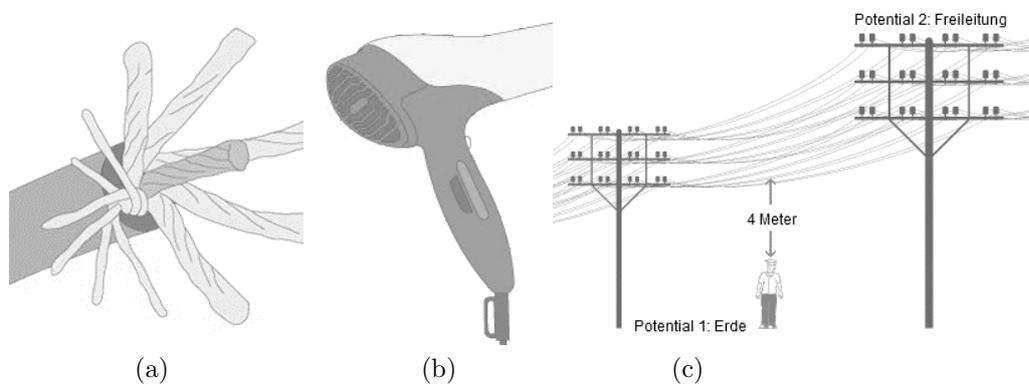


Abbildung 7: Schutz durch Isolation (a), Abdeckung (b) und Abstand (c) [6]

4 Fehlerschutz gegen indirektes Berühren

4.1 Schutz durch Abschaltung

Überschreiten Spannung oder Strom die jeweils zulässigen Grenzwerte, so ist eine zeitnahe Abschaltung zum Schutz von Mensch und Betriebsmittel durchzuführen. Zur Abschaltung existieren je nach Einsatzzweck verschiedene Einrichtungen (Abbildung 8).



Abbildung 8: Arten von Abschalteinrichtungen [6]

Schmelzsicherungen sind wie Leistungsschalter Überstromschutzeinrichtungen, bei denen gemäss ihrer Bezeichnung der Schmelzleiter (siehe Abbildung 9) bei Überlast schmilzt. Überschreitet der Strom eine vordefinierte Stromstärke von 6 bis 200 A, welche stets auf der Sicherung verzeichnet ist (z.B. 16 A in Abbildung 8 links) und fließt dieser über einen ausreichend langen Zeitraum, so wird durch den geschmolzenen Leiter der Stromfluss in der Sicherung unterbrochen [10]. Wird anhand des Sichtplättchens die Unterbrechung der Sicherung erkannt, so wird durch unterschiedliche Passgrößen der Austausch durch eine Schmelzsicherung mit zu hohem Nennstrom verhindert [5].

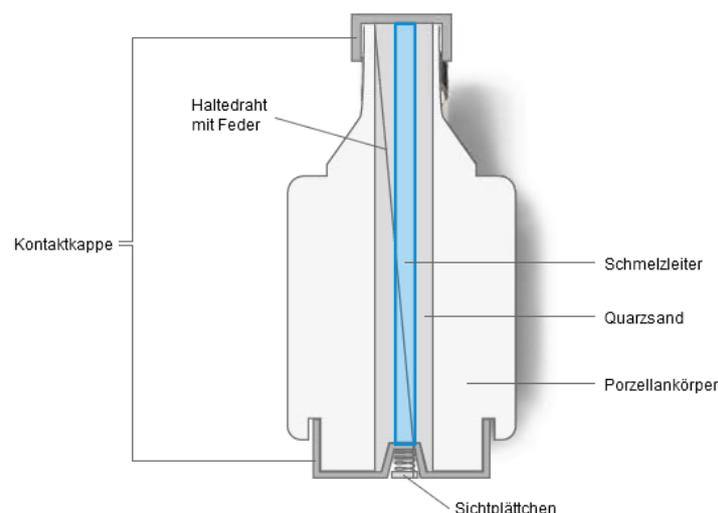


Abbildung 9: Aufbau einer Schmelzsicherung [6]

Leistungsschutzschalter besitzen einen thermischen und einen magnetischen Auslöser, womit sie sowohl gegen Überlast als auch gegen Kurzschlussströme schützen. Liegt der sogenannte Abschaltstrom länger als eine definierte Zeit an, verbiegt sich ein Bimetall Streifen (dargestellt in Abbildung 10 links), entriegelt das Schaltschloss und schaltet somit automatisch ab. Die Kurzschlussstromabschaltung übernimmt der elektromagnetische Auslöser in Form der stromdurchflossenen Spule, deren magnetische Kraft ab einer bestimmten Stromstärke mittels des Schlagankers das Schaltschloss betätigt. Zur zusätzlichen Sicherheit ist auch eine Freiauslösung am Schaltschloss per Hand möglich [7].

Leistungsschalter basieren auf der gleichen Funktionsweise wie auch Leistungsschutzschalter, allerdings sind sie meist für höhere Ströme, wie z.B. bei Kleinmotoren in der Industrie, ausgelegt.

Schmelzsicherungen und Leistungsschalter dienen als Überstromschutzeinrichtungen in erster Linie dem Schutz der Betriebsmittel vor Überlastung sowie dem Brandschutz und bieten nur bei ausreichend hohen Kurzschlussströmen (genauer in Abschnitt III) eine Schutzfunktion vor gefährlichen Körperströmen.

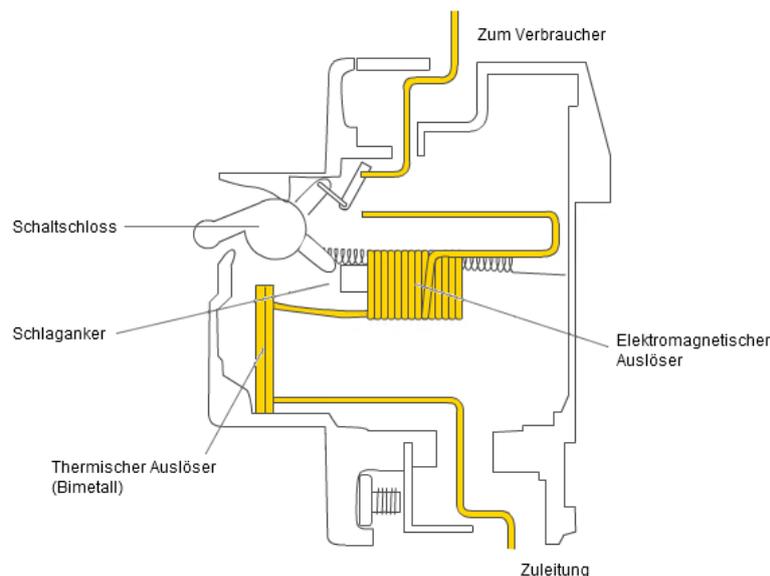


Abbildung 10: Querschnitt eines Leistungsschutzschalter[6]

Der Fehlerstromschutzschalter (auch FI oder RCD für Residual Current protective Device) ist dagegen speziell auf die Ausschaltung von Fehlerströmen ausgelegt. Bei Anschluss von Phasen- und Neutraleiter gemäss Abbildung 11 wird die Summe der hereinfließenden Ströme mit dem zurückgeleiteten Strom verglichen. Bei einer Abweichung des Summenstroms in den Primärleitern (6) fließt bedingt durch den Summenstromwandler (7) ein Strom im Sekundärkreis (8), wodurch das Schaltschloss (1) über die Auslösespule (2) ausgelöst wird. Um ein sicheres Ausschalten gewährleisten zu können, ist eine regelmässige Prüfung mittels der Prüftaste (4) zu empfehlen, wodurch über den Widerstand (3) im Prüfkreis (5) ein Strom zur gewollten Ausschaltung führt.

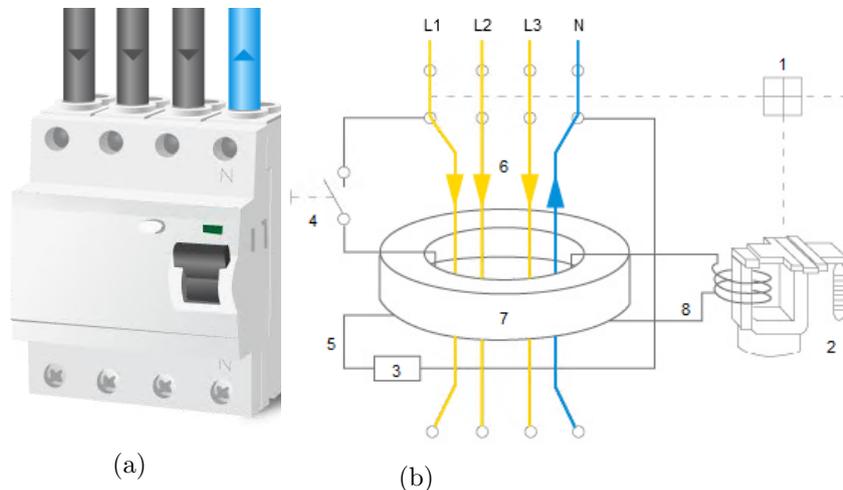


Abbildung 11: Aufbau eines Fehlerstrom-Schutzschalters (RCD) [6]

Je nach Art der Fehlerstroms werden RCD in drei Bauarten eingeteilt. Während Typ AC lediglich rein sinusförmige Fehlerströme schalten kann, da sonst der Gleichanteil den Summenstromwandler in die Sättigung treibt, erfasst Typ A auch pulsierende Gleichströme. Allstromsensitive FI-Schalter vom Typ B, für dessen Erfassung jedoch eine netzabhängige Überwachung erforderlich ist, erfassen auch glatte Gleichströme, wie zum Schutz von Frequenzumrichtern [6]. Problematischerweise erhöht sich durch diese Schutzmassnahme jedoch deutlich das Risiko unerwünschter Auslösungen aufgrund von betriebsbedingten kapazitiven Ableit- und Einschaltströmen, die z.B. von Filterkondensatoren in Umrichtern verursacht werden. Eine häufige Lösung ist der Einsatz von RCD mit Ansprechverzögerung, die jedoch normgerecht nur in engen Grenzen eingesetzt werden können [11].

Hauptvorteil der FI-Schalter liegt in den sehr geringen Ausschaltströmen bei kurzer Ausschaltzeit, die mit gewöhnlichen Überstromschutzeinrichtungen, wie Leistungsschutzschaltern nur schwer zu erreichen sind. Wie in Abbildung 12 zu sehen, sind bei Leistungsschutzschaltern für kurze Auslösezeiten, wie z.B. die für Steckdosen geforderten 0.4 s, Kurzschlussströme in vielfacher Höhe des Bemessungsstromes erforderlich. Dies führt mitunter zu unwirtschaftlichen notwendigen Erdungswiderständen auf die in Abschnitt III genauer eingegangen wird, sodass häufig nur mittels RCD eine sichere Abschaltung möglich ist.

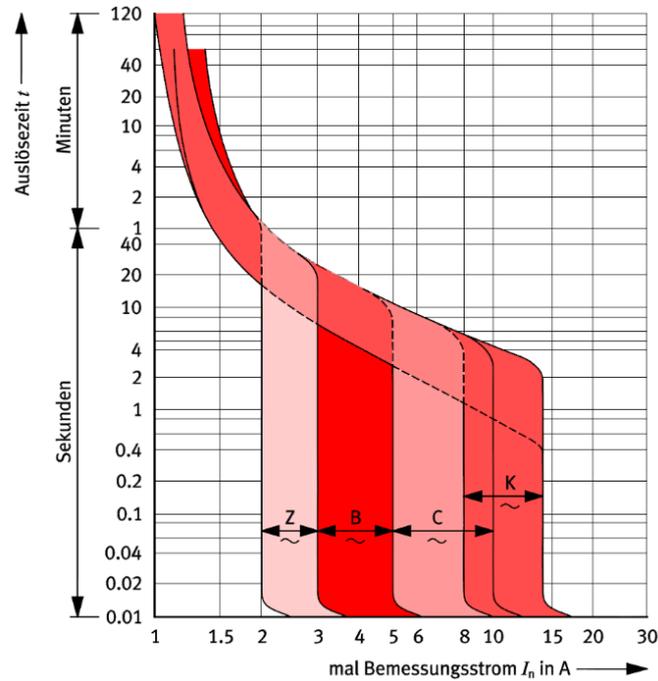


Abbildung 12: Auslösekennlinien von Schutzschaltern, Z: Halbleiterschutz und hohe Netzimpedanz, B: Standard Leistungsschutz, C: höherer Einschaltstrom, K: hoher Einschaltstrom, sensible Überlastauslösung [6]

4.2 Schutz ohne Abschaltung

Zusätzlich zum Schutz durch Stromabschaltung existieren weitere netzunabhängige Massnahmen zum Berührungsschutz im Fehlerfall. Die Schutztrennung beruht auf der galvanischen Separation der Stromkreise und erfolgt über einen sogenannten Trenn-Transformator wie in Abbildung 13. Dessen Wicklungen sind besonders effektiv voneinander isoliert. Bei einem Fehler an einem Betriebsmittel wird somit durch die Isolation ein Stromfluss zwischen den Wicklungen verhindert und die Stromkreise sind galvanisch entkoppelt.

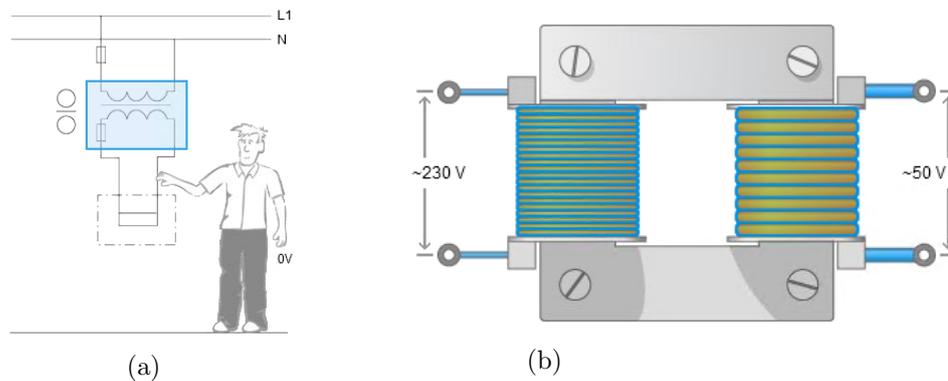


Abbildung 13: Schutztrennung (a) und Trenntransformator (b) [6]

Beim Hauptpotentialausgleich werden in Neubauten alle leitfähigen Gebäude- und Anlagenteile wie in Abbildung 14 über eine Haupterdungsschiene mit dem Fundamenterder des Gebäudes verbunden. Somit wird einerseits der Erdungswiderstand durch die Vernetzung deutlich herabgesetzt und andererseits das Auftreten von grossen Potentialdifferenzen innerhalb des Hauses weitestgehend vermieden. Der Potentialausgleich gilt jedoch nicht alleinstehend als Schutzmassnahme, sondern nur in Verbindung mit einer automatischen Abschaltung der Stromversorgung durch die bedingt hohen Kurzschlussströme.

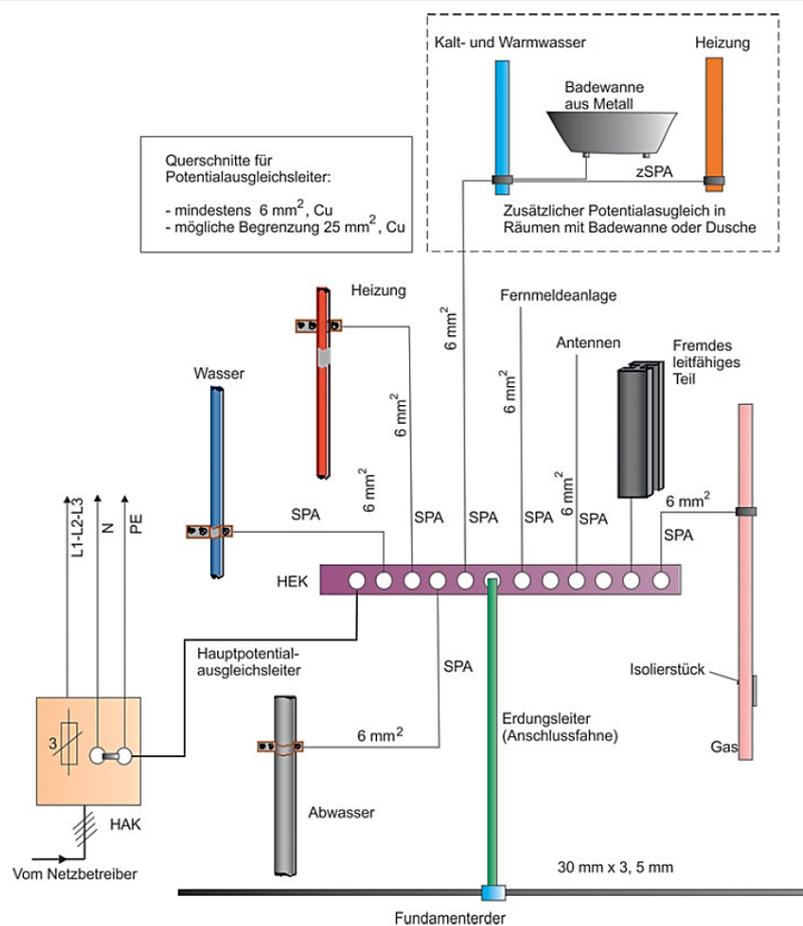


Abbildung 14: Hauptpotentialausgleich mit Fundamenterder (HAK = Hausanschlusskasten, HEK = Haupterdungsklemme, SPA = Schutzpotentialausgleich) [7]

Beim zusätzlichen örtlichen Potentialausgleich werden zudem alle gleichzeitig berührbaren Körper und fremden Leiter mit einem Ausgleichsleiter verbunden und vermindern somit Potentialdifferenzen in Räumen mit besonderer Gefährdung, wie z.B. Badezimmern. In den Potentialausgleich werden auch die Schutzleiter aller Steckdosen und Apparate im betroffenen Raum integriert [1].

Bei Verwendung von Betriebsmitteln der Schutzklasse II können durch Verstärkung oder Verdopplung der Basisisolierung (Abbildung 15) gefährliche Berührungsspannungen nahezu ausgeschlossen werden. Die zusätzliche Isolierung darf an keiner Stelle unterbrochen sein. Nachteilig ist hierbei, dass Isolationsfehler in der Basisschicht nicht erkannt werden und das System danach unerkannt nur noch den Schutz einer Basisisolierung bietet.

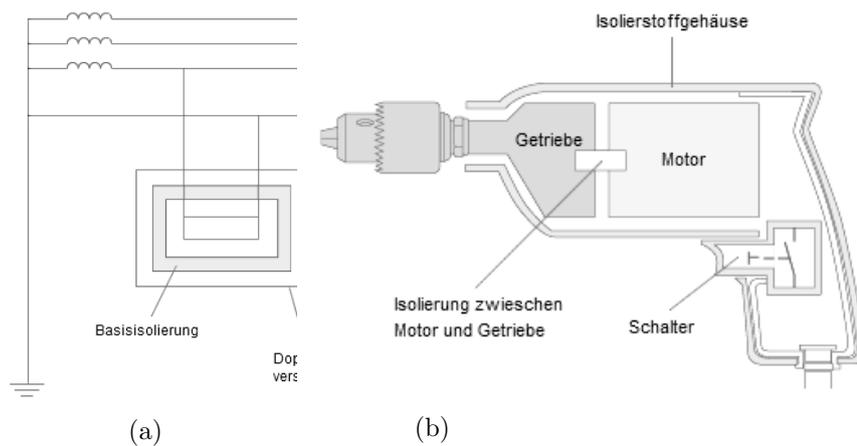


Abbildung 15: Schutz durch doppelte oder verstärkte Isolierung [6]

In Messlaboren und Prüfständen wird auch häufig der Schutz durch nichtleitende Räume, auch isolierter Standort genannt, eingesetzt. Hier wird durch sehr hochohmige Böden, Wände und Abdeckungen eine Verbindung des Menschen zur Erde und somit ein Kurzschluss verhindert. Hierbei müssen selbstverständlich alle Objekte im Handbereich der Zielperson im Schutz integriert, also hochohmig isoliert sein [5].

5 Schutz durch Kleinspannung

Erweiterten Schutz vor direktem & indirektem Berühren bieten maximal zulässige Kleinspannungen ELV (extra low voltage) von 50 V_{AC} und 120 V_{DC} . Bei den Massnahmen wird gemäss Verschaltung in Abbildung 16 zwischen den Sicherheits- (Safety ELV) und Funktionskleinspannungen (Protective ELV) unterschieden. Die Grenzwerte für Gleich- und Wechselspannung entsprechen den dauerhaft zulässigen Berührungsspannungen für Erwachsene und gelten als nicht lebensbedrohlich [4].

Die Sicherheitskleinspannungen SELV werden ungeerdet betrieben. Bei Fehlern werden so keine höheren Spannungen über den Schutzleiter in den SELV-Kreis hinein übertragen. Zur Erzeugung der SELV werden Sicherheitstransformatoren (siehe Abbildung 17) eingesetzt, bei denen Kurzschlüsse zwischen Primär und Sekundärseite sowie deren Anschlüssen nicht möglich sind.

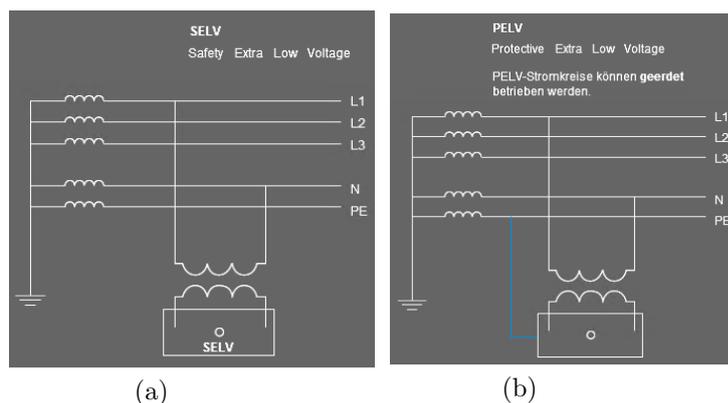


Abbildung 16: Schutz durch Sicherheits- und Funktionskleinspannung (SELV&PELV) [6]

Bei Systemen mit Funktionskleinspannung PELV dürfen Betriebsmittel geerdet werden. Gehäuse und aktive Teile sind mit dem Schutzleiter über Erde verbunden. Auch hier findet der Einsatz von Sicherheitstransformatoren statt. PELV wird dann eingesetzt, wenn die Erdung der Körper oder aktiven Teile zwingend notwendig ist. Beispiel hierfür ist der Potentialausgleich zur Vermeidung von Funkenbildung in Behältern und explosionsgefährdeten Umgebungen oder bei der Schirmung von Audiogeräten die am Gehäuse geerdet sind [5].



Abbildung 17: Sicherheitstransformator [6]

6 Prüfung vor Schutzanlagen

Vor dem Arbeiten an elektrischen Anlagen, sowie grundsätzlich zur regelmässigen Kontrolle der Betriebsmittel ist folgende Sicherheitsreihenfolge einzuhalten:

1. Besichtigen
2. Erproben
3. Messen

Um bei möglichem Versagen der Schutzeinrichtungen im Fehlerfall eine Berührung aktiver Teile auszuschliessen, ist zunächst eine genaue Betrachtung des Systems von Nöten. Mögliche Aspekte sind hierbei insbesondere der Zustand der jeweiligen Isolation, die Existenz und Korrektheit von Anlagendokumentation und Bauplänen sowie deren Ausführung. Weitere Punkte sind die Einhaltung von Abständen, Einsatz von Hindernissen und Abdeckungen sowie deren Robustheit gegenüber den vorherrschenden äusseren Einflüssen. Einige Beispiele hierzu sind in Abbildung 18 abgedeckt.

Kann entsprechend dieser Gesichtspunkte eine Gefahr durch die Betriebsmittel ausgeschlossen werden, gilt es die Wirksamkeit der Schutzeinrichtungen vor den eigentlichen Arbeiten zu überprüfen. Hierzu gehört neben dem Testen von Not-Aus und RCD auch die Überprüfung von Anzeige- und Meldeinrichtungen, wie beispielsweise Warnleuchten oder die Isolationsüberwachung.

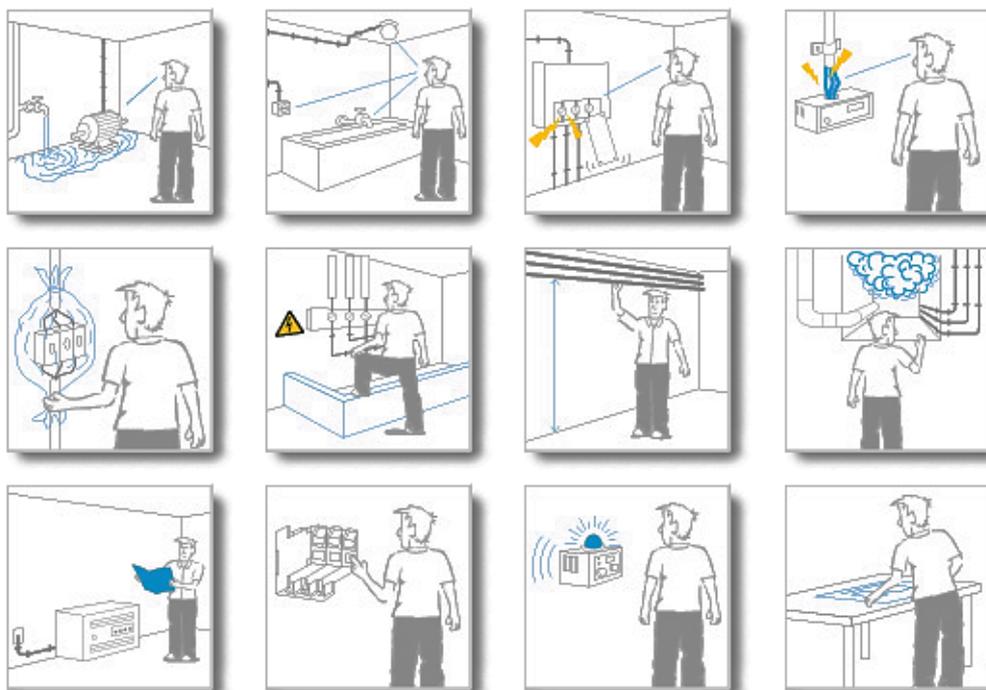


Abbildung 18: Besichtigung vor dem Arbeiten an elektrischen Anlagen [6]

Teil III

Erdung in der Niederspannung

In Niederspannungs- und Hausnetzen werden verschiedenen Netzstrukturen je nach Anwendung eingesetzt, die sich aufgrund Ihrer unterschiedlichen Sternpunktterdung bei der Fehlerbehandlung unterscheiden:

- IT (franz. isolé terre)
- TT (franz. terre terre)
- TN-C, TN-S, TN-C-S (franz. terre neutre combiné und/oder séparé)

7 IT-Netz

IT steht für isolierte Erde und bedeutet, dass nur das leitfähige Gehäuse des Verbrauchers geerdet ist, während der Sternpunkt gegen Erde isoliert ist. Diese Netzstruktur, wie z.B. in Abbildung 27 (b), wird insbesondere in Krankenhäusern (Intensivstation und OP) sowie in der chemischen Industrie wegen der Explosionsgefahr verwendet. Beim Auftreten eines ersten einphasigen Fehlers gegen Erde erfolgt keine Abschaltung, sondern nur eine Meldung, dass der Fehler unverzüglich behoben werden muss, sodass ein Stromausfall z.B. im OP-Saal vermieden werden kann. Aufgrund des isolierten Betriebes bleibt die Spannung zwischen den Phasenleitern gleich, sodass beispielsweise dreiphasige Motoren weiter zwischen den Phasen betrieben werden können. Zuständig für die Fehlermeldung ist die Isolationsüberwachung, die einschreitet sobald der zulässige Isolationswiderstand unterschritten ist. In ausgedehnten Netzen schliesst allerdings die Kapazität des Verteilnetzes den Stromkreis, sodass Fehlerströme fließen, die jedoch durch die geringe Stromstärke nicht zum Auslösen der Abschaltvorrichtung führen. Allerdings kann es beim Einsatz von RCDs aufgrund der kapazitiven Ableitströme bereits nach dem ersten Fehler zur Abschaltung kommen. Da die Spannung zwischen Leiter und Erde um die Wurzel von drei angehoben ist, sind sowohl Mensch als auch z.B. die Isolatoren in der Hochspannung deutlich höheren Beanspruchungen ausgesetzt. Erst bei einem Fehler einer zweiten Phase gegen Erde erfolgt dann die Abschaltung durch einen Fehlerstromschutzschalter. Aufgrund dieser beschränkten Schutzwirkung wird IT nur in den genannten Ausnahmefällen eingesetzt und bietet nur sehr beschränkten Schutz für den Menschen [1].

8 TT-Netz

TT-Netze (für franz. terre terre = „Erde-Erde“) finden sich insbesondere in der Landwirtschaft und Grossindustrie sowie in ortsveränderlichen Verteilnetzen wie Schaustellwagen und sind betriebsmässig sowohl am Sternpunkt als auch separat am leitfähigen Gehäuse geerdet [3]. Die Abschaltung übernimmt ausschliesslich der Fehlerstromschutzschalter, da die Erdungswiderstände (also der Pfad vom aktiven Leiter über Fehlerstelle und Schutzleiter zur Stromquelle) durch die fehlende direkte Verbindung zum Sternpunkt (Abbildung 27 (a)) für gewöhnlich sehr hoch sind. Entsprechend der folgenden Beziehung zwischen Nenn-Abschaltstrom und der zulässigen Berührungsspannung sind daher sehr geringe Erdungswiderstände zulässig. Nur so sind die auftretenden Kurzschlussströme ausreichend hoch um eine schnelle Abschaltung zu gewährleisten [7].

Für den Erdungswiderstand R_A gilt folgende Beziehung:

$$R_A = \frac{U_L}{I_A} \quad (1)$$

mit U_L als maximal zulässige Berührungsspannung und I_A als Nennfehlerstrom der Abschalteneinrichtung.

Ausgehend von der maximalen Berührungsspannung sind für eine automatische Abschaltung durch Sicherungen Erdungswiderstände kleiner $20\ \Omega$ erforderlich, welche mit Einzelerdern nicht wirtschaftlich realisierbar sind. Daher sind in TT-Netzen RCD vorgeschrieben, mit denen sich der erlaubte Erdungswiderstand auf etwa $1.5\ \text{k}\Omega$ erhöht.

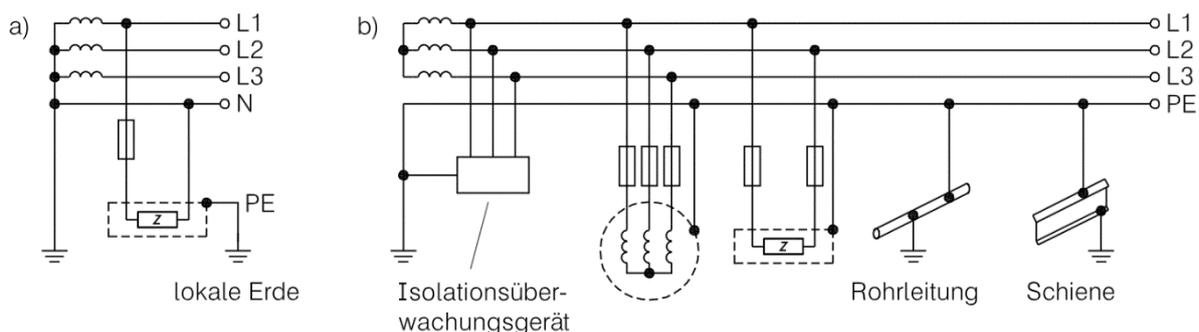


Abbildung 19: Aufbau von TT-Netz (a) mit Verbraucher Z (z.B. Lampe mit gestricheltem Gehäuse) und (b) Aufbau des IT-Netz [4]

9 TN-Netze

Als Weiterentwicklung des TT-Netz mit geringerem Erdungswiderstand ist daher im deutschsprachigen Raum die Hausverteilung mittels TN-C-S sehr weit verbreitet. Grundkonzept ist das TN-Netz, wobei TN für neutrale Erde (franz. terre neutre) steht und bedeutet, dass der Sternpunkt der Stromquelle geerdet ist und über einen zusätzlichen Leiter an das leitfähige Gehäuse des Verbrauchers angeschlossen ist. Somit sind die Gebäude mit dem geerdeten Netzpunkt durch den vierten PEN-Leiter (engl. protective earth neutral) verbunden. Da Erde und Neutralleiter als kombinierter Leiter ausgeführt sind, spricht man von TN-C (combiné). Ziel dieser Erdverbindung ist die Verkleinerung des Erdwiderstandes (daher früher auch „Nullung“) um somit eine schnellere Abschaltung durch hohe Ströme zu ermöglichen.

Bei der modernen Nullung wird fortan der PEN vom Verteilnetz herkommend beim Verbraucher aufgetrennt und dann separiert (TN-S für séparé) als blauer Neutralleiter und gelb-grüner PE-Schutzleiter geführt (siehe Abbildung 20). Diese werden im weiteren Verlauf nicht mehr zusammengeführt und der Schutzleiter darf auch ausschliesslich als leitfähige Schutzerdung von Anlagen und Sternpunkt eingesetzt werden.

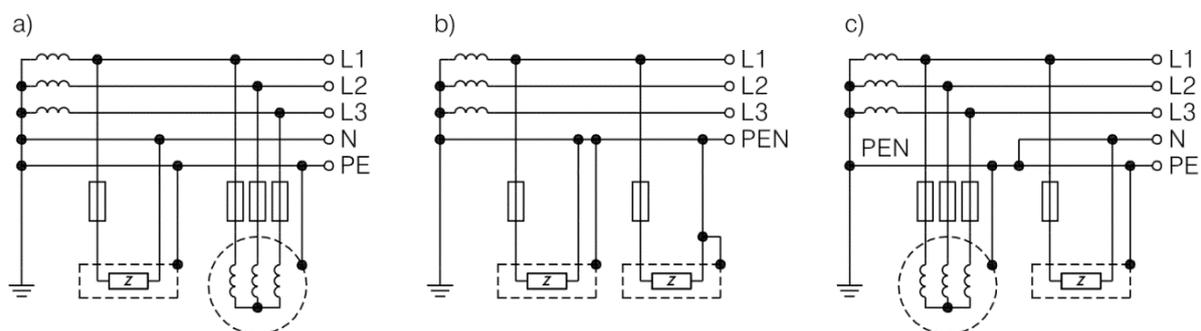


Abbildung 20: Aufbau von TN-S (a), TN-C (b) und TN-C-S (c) Netzen [4]

Wird der geforderte Mindestleiterquerschnitt von 10 mm^2 bereits vorher unterschritten, so ist der PEN direkt aufzutrennen [6]. Somit soll ein Bruch des PEN-Leiters verhindert werden, wodurch der Schutz nicht mehr gewährleistet wäre. Bei der klassischen Nullung TN-C besteht ein Problem darin, dass beim Vertauschen der beiden Leiter die Schutzkontakte der Steckdose auf Spannung gesetzt werden konnten, da der PEN auch zur Rückleitung verwendet wird [12].

Teil IV

Versuchsdurchführung

Ziel der folgenden Praktikumsversuche ist es, ein Grundlagenwissen über Niederspannungsnetze und deren Aufbau zu vermitteln sowie mögliche Gefahren für Mensch und Betriebsmittel frühzeitig erkennen und deren Auswirkungen einschätzen zu können. Anhand der Versuchsanordnung können zahlreiche Fehler konstruiert werden und deren mögliche Erkennung und Abschaltung durch Sicherungen und FI-Schalter untersucht werden. Vor Einschalten der Spannungsversorgung soll gemeinsam eine sinnvolle Verschaltung entworfen und mögliche Folgen diskutiert werden. Bei ausbleibender Unterbrechung kann die Berührungsspannung gemessen und der zu erwartende Körperstrom durch den Menschen ermittelt werden. Mithilfe der Ergebnisse sollen dann Fehler analysiert und Nachteile sowie Verbesserungspotentiale der unterschiedlichen Schaltungen ermittelt werden.

1 Vorbereitende Aufgaben - Bitte vor dem Versuch lösen

1. Erklären Sie den Begriff Basisisolierung. Wozu dient sie?

2. Erklären Sie welche Schutzmassnahmen existieren, um einen direkten Kontakt mit dem Leiter zu vermeiden.

3. Wie gross darf die maximal zulässige Berührungsspannung sein (AC und DC)?

4. Erklären Sie die Funktionsweise des Leistungsschutzschalters. Wozu dienen sie? Ermitteln Sie zudem die Abschaltchwelle (Bemessungsstrom I_n) des Leistungsschutzschalters S401E-B6 von ABB.

5. Beschreiben Sie die Funktion des FI-Schutzschalters. Wie erkennt man einen FI-Schalter? Notieren Sie die Unterschiede der drei FI-Typen in der untenstehenden Tabelle. Ermitteln Sie zudem den maximal zulässigen Fehlerstromfluss des FI-Schutzschalters.

Typ AC	Typ A	Typ B

2 Versuch 1 - TN-S Netz

Im ersten Versuch wird das TN-S Netz auf das Problem der klassischen Nullung bei Leiterbruch und mögliche Schutzmassnahmen untersucht. Gehen Sie hierzu bitte wie folgt vor:

1. Notieren Sie die Unterschiede zwischen TN-C und TN-S Netzen.

2. Verbinden Sie die Glühlampe über das Hausnetz durchgängig als TN-S Netz an die Verteilerstation. Als Hilfestellung können Sie die Abbildung 21 verwenden.

Lassen Sie den Aufbau vom Betreuer abnehmen bevor Sie einschalten.

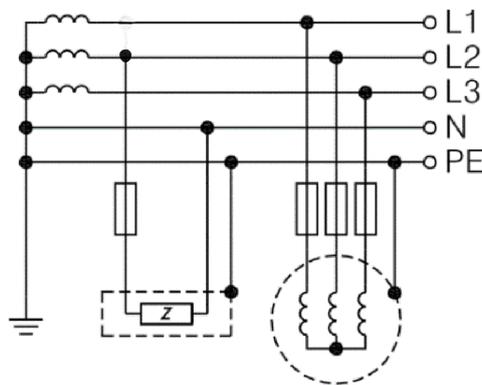


Abbildung 21: Aufbau des TN-S Netzes - Ersatzschaltbild.

3. Stellen Sie sich folgende Situation vor: Die Glühlampe weist einen Defekt auf und die Phase (L2) berührt dabei das Lampengehäuse. Ein Kurzschluss entsteht, welcher auch direkter Gehäuseschluss genannt wird.

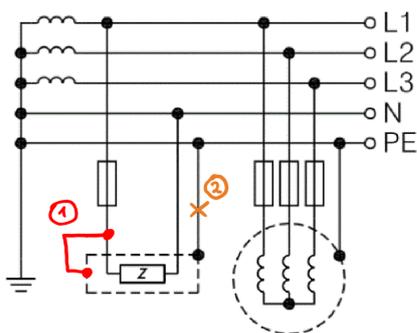
- a) Zeichnen Sie dazu das Ersatzschaltbild mithilfe von Abbildung 21.

b) Überlegen Sie sich, wo der Kurzschlussstrom (auch: Fehlerstrom) fließt. Berechnen Sie diesen Strom für den Fall des idealen Leiters mit Widerstand $0\ \Omega$ sowie für einen realen Leiter mit Widerstand $1.5\ \Omega$. Die Glühlampe hat einen Widerstand von $10\ \text{k}\Omega$.

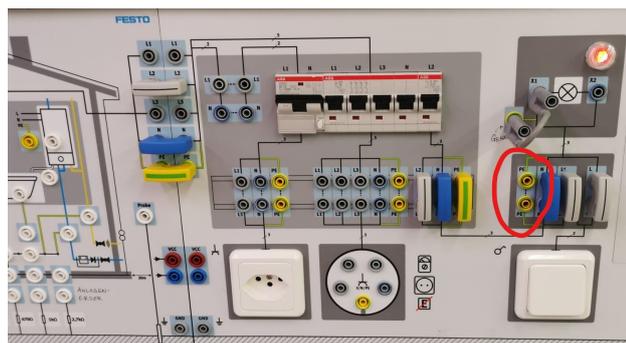
4. Ist mit einer automatischen Sicherheitsabschaltung durch die Sicherungen zu rechnen? Welche Sicherungen werden ausschalten, welche nicht?

5. Stellen Sie nun mit einer Sicherheitslaborleitung den genannten Kurzschluss her und überprüfen sie die vorher aufgestellten Behauptungen. Ist eine Spannungsabschaltung erfolgt? Weshalb?

6. Simulieren Sie nun **zusätzlich** zum direkten Gehäuseschluss den Fehler eines defekten PE-Leiters am Gehäuse. Unterbrechen Sie dazu den durchverbundenen PE-Leiter direkt am Gehäuse wie in Abbildung 22 gezeigt. **Schalten Sie noch nicht ein.**



(a) Ersatzschaltbild mit direktem Gehäuseschluss (1) und defektem Erdleiter (2)



(b) Direkter Gehäuseschluss (graues Kabel) **und** defekter Erdleiter (roter Kreis)

Abbildung 22: Defekter Erdleiter

7. Welche Berührungsspannungen erwarten Sie wo, wenn Sie die Schaltung trotz Kurzschluss einschalten? Was geschieht mit der Lampe und den Sicherungen? Was passiert wenn ein Mensch die Schaltung berührt?

8. Schalten Sie nun die Versorgungsspannung ein und registrieren Sie eine mögliche automatische Abschaltung. Überprüfen Sie Ihre obigen Behauptungen.

9. Simulieren Sie nun mithilfe des Modell-Körperwiderstands (graue Box) die Berührung des Gehäuses durch einen Menschen. Schliessen Sie dazu die graue Box zwischen Gehäuse und Erde an. Was beobachten Sie? Wie gross ist der zu erwartende Körperstrom durch den Mensch mit und ohne Fehlerstrom-Schutzschalter (RCD)?

10. Nehmen Sie an, dass kein RCD verbaut wurde. Welche Sicherungen würden ausschalten? Was schliessen Sie daraus? Was würde passieren falls kein FI-Schalter verbaut wäre?

3 Versuch 2 - TN-C Netz und Potentialausgleich

Als Alternative zu den modernen TN-S Netzen bietet sich auch die Verlegung als TN-C oder TT-Netz an. Das konventionelle TN-C Netz wird im nachfolgenden Versuch untersucht:

1. Schliessen Sie nun erneut die Glühlampe an das Hausnetz an. Verlegen Sie dieses Mal das gesamte Spannungsnetz als TN-C Netz (ohne Haus- und Anlagenerder). Als Hilfestellung können Sie die Abbildung 23 verwenden. Vergessen Sie nicht, das Gehäuse entsprechend dem TN-C Netz zu erden. Verwenden Sie statt des PEN, den N Leiter beim Versuchsaufbau. **Lassen Sie den Aufbau vom Betreuer abnehmen bevor Sie einschalten.**

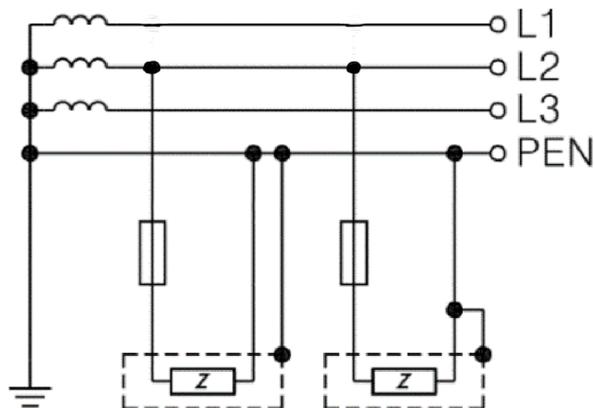


Abbildung 23: Ersatzschaltbild vom Aufbau des TN-C Netzes. Das Lampengehäuse über PEN Leiter geerdet.

Beachten Sie zudem, dass falls ein Gerät auf keinem definierten Potential ist, so wird es als **float** bezeichnet. Dabei wird ein zufällig/angenäherter Wert vom Messgerät gewählt.

2. Messung der Ausgangslage: Messen Sie die Spannung zwischen dem Lampengehäuse (Gelb-Grün) gegen den spannungsführenden Leiter L2, den Neutralleiter, die Netzerde in Modul 1 (ganz links, Modul mit dem roten Notaus-Schalter) sowie gegen die Heizung.

Tabelle 1: Spannungsmessung im Normalzustand

Gehäuse gegen	L2 (X1)	N (X2)	Netzerde	Heizung
Spannung in V				

3. Initiieren Sie gemäss Abbildung 24 einen künstlichen Leiterbruch des PEN-Leiters nahe vor dem Hausanschluss durch Unterbrechen der Verbindung. Verwenden Sie diesen Unterbruch auch für die künftigen Teilaufgaben.

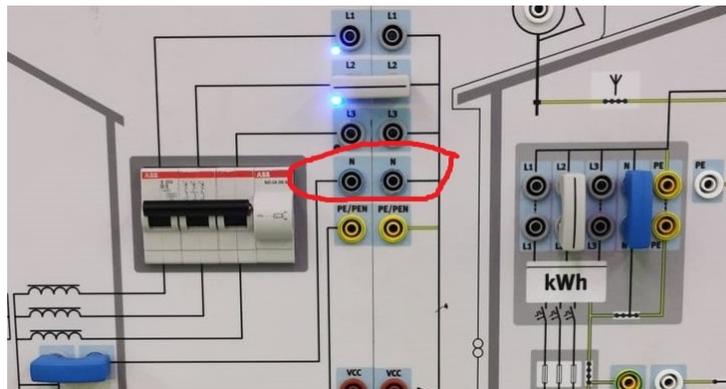


Abbildung 24: Rot: Unterbruch des PEN-Leiters

Welche Folgen erwarten Sie? Weshalb schalten die Sicherungen nicht aus?

4. In Abbildung 25 ist die Situation mit und ohne Unterbruch dargestellt.

a) Füllen Sie in die grauen Felder das Potential gegenüber PEN-Leiter in Volt aus.

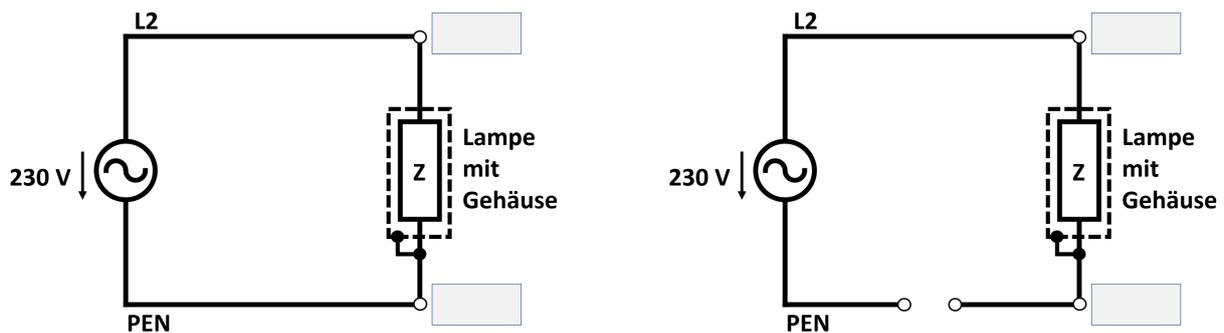


Abbildung 25: Ersatzschaltbild mit und ohne Unterbruch

b) Welche Spannung erwarten Sie am Gehäuse gegenüber Erde?

5. Verifizieren Sie Ihre Behauptungen.

a) Messen Sie dazu die Spannung des Lampengehäuses gegen den spannungsführenden Leiter, den Neutraleiter, die Netzerde sowie gegen die Heizung.

Tabelle 2: Spannungsmessung bei PEN Unterbrechung

Gehäuse gegen	L2 (X1)	N (X2)	Netzerde	Heizung
Spannung in V				

b) Messen Sie zusätzlich die Spannung zwischen Heizung und Netzerde.

Tabelle 3: Spannungsmessung bei PEN Unterbrechung

Netzerde gegen	Heizung
Spannung in V	

6. Wie würden Sie die Heizung im Haus auf ein definiertes Potential bringen?

Diskutieren Sie die bisherigen Resultate und Werte mit dem Assistenten.

7. Verbinden Sie nun gemäss Abbildung 26 den PEN-Leiter mit allen leitenden Gegenständen im Gebäude (Boiler, Heizung).

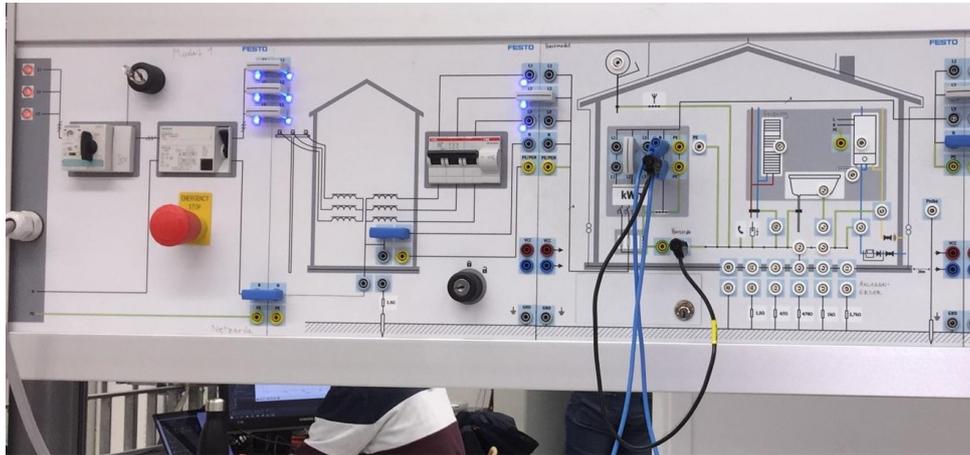


Abbildung 26: Anschluss Hauserde an PEN-Leiter

- a) Messen Sie erneut folgende Spannungen:

Tabelle 4: Spannungsmessung bei PEN Unterbrechung

Netzerde gegen	L2 (X1)	N (X2)	Hauserde	Heizung
Spannung in V				

- b) Ist eine Änderung gegenüber der Messung aus Aufgabe 5 eingetroffen? Was sind die Gefahren? Spielt es hierbei eine Rolle, wo der künstliche Leiterbruch im PEN-Leiter geschieht?

8. Schliessen Sie nun die Hauserde an den Anlagenerder an (unterhalb des Hauses angeschrieben). Wählen Sie die Verbindung ohne Widerstand und erden Sie diese mit der Netzerde. **Schalten Sie noch nicht ein.** Was passiert mit dem Stromfluss? Erwarten sie eine Abschaltung der Schutzschalter?

9. Schalten Sie nun die Versorgungsspannung ein. Registrieren Sie eine mögliche automatische Abschaltung? Überprüfen Sie Ihre obigen Behauptungen.

10. Überlegen Sie sich, wie Sie die Verbindungen zum Anlagenerder ändern können, damit der Stromfluss aufrechterhalten werden kann.

Nehmen Sie nun diese Änderungen vor und besprechen Sie Ihre Lösung und Beobachtungen mit dem Assistenten.

- a) Welche Spannungen messen Sie nun?

Tabelle 5: Spannungsmessung bei PEN Unterbrechung

Netzerde gegen	L2 (X1)	N (X2)	Hauserde	Heizung
Spannung in V				

- b) Was passiert mit der Lampe? Was stellen Sie fest?

11. Wie schätzen Sie die Situation bezüglich Sicherheit ein? Welches Problem ist immer noch vorhanden? Überlegen Sie sich eine Lösung, um das Problem zu beheben.

4 Versuch 3 - Andere Stromnetze

In der Schweiz ist das gesamte Stromnetz als eine Kombination zwischen TN-S-Netz und TN-C-Netz aufgebaut; das sogenannte TN-C-S-Netz. In wichtigen Gebäuden (z.B. Spitäler) wird stattdessen das IT-Netz verwendet. Neben diesen zwei neuen Netzen, gibt es noch das TT-Netz. Diese werden in den folgenden Aufgaben untersucht

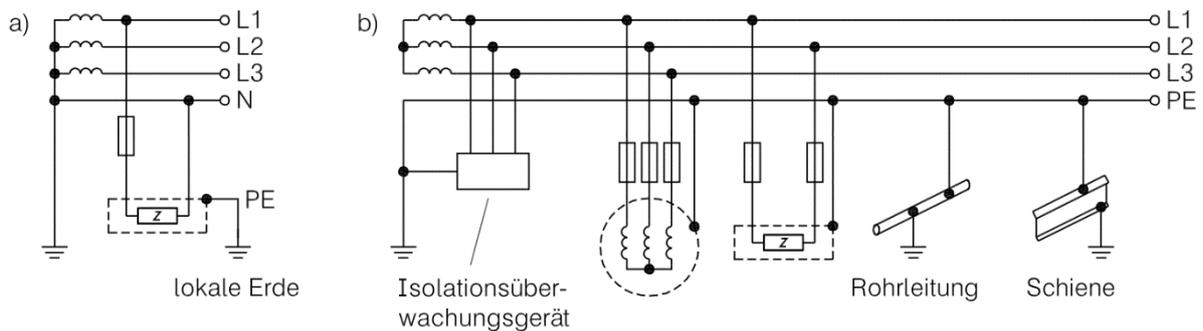
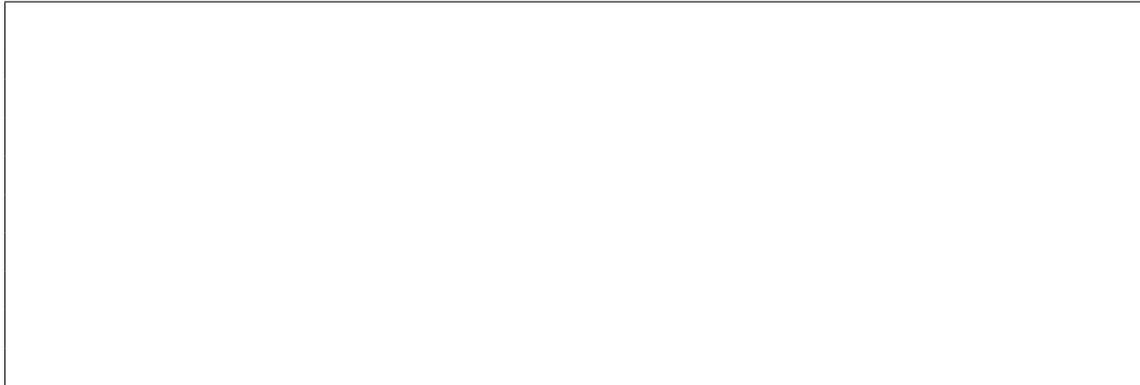


Abbildung 27: Aufbau von TT-Netz (a) und (b) Aufbau des IT-Netz.

1. Welche Eigenschaften zeichnen das IT-Netz aus? Was ist für die Komponenten im Stromkreis zu beachten bei einem einphasigen Fehler?

2. Welche Eigenschaften zeichnen das TT-Netz aus? Worin liegen die Unterschiede beim Ausschalten von Last- und Fehlerströmen zum TN-S-Netz?

3. a) Zeichnen Sie zum TN-C-S Netz das Ersatzschaltbild.



b) Inwiefern liegt das TN-C-S-Netz in der Schweiz vor? Worin liegen die Vor- und Nachteile bei dieser Anwendung?

5 Versuch 4 - Ausschaltvermögen von RCD

FI-Schalter bieten einen hohen Schutz vor Körperströmen durch Erkennung geringer Fehlerströme. Wir haben gelernt, dass sie im Ernstfall dem Menschen das Leben retten können. Für ein tieferes Verständnis des zugehörigen Mechanismus sind folgende Situationen zu analysieren:

1. Entfernen Sie das Haus- und Lampen-Modul und schliessen Sie das FI-Modul als TN-S Netz an die Verteilerstation an.
2. Testen sie die FI-Schalter. Bei welchen Strömen erwarten Sie eine Abschaltung der FI-Schalter?

Tabelle 6: Erwarteter Abschaltstrom I_{Δ_n}

	Wechselstrom	Gleichstropulse	Gleichstrom (glatt)
I_{Δ_n} [mA] Typ A			
I_{Δ_n} [mA] Typ B			

3. Verbinden Sie den Fehlersimulator zunächst über den Typ A FI-Schalter. Der Fehlersimulator besteht aus einem Widerstand, der mittels Potentiometer eingestellt werden kann (Achtung: + für niederohmig, - für hochohmig), und einem Tastschalter zum initiieren von kurzzeitigen Kurzschlüssen. Dazwischen befindet sich ein Regler zum Einstellen verschiedener Stromformen.

Schliessen Sie das Multimeter so an, dass Sie nun den Fehlerstrom (zwischen X3 und X4) bis zum Ausschalten des FI-Schalters für verschiedene Stromwelligkeiten, messen können.

4. Notieren Sie den Abschaltstrom der beiden FI Schalter für die unterschiedlichen Stromwelligkeiten

Tabelle 7: Gemessener Abschaltstrom I_{Δ_n}

	Wechselstrom	Gleichstropulse	Gleichstrom (glatt)
I_{Δ_n} [mA] Typ A			
I_{Δ_n} [mA] Typ B			

5. Welche maximale Auslösezeit erwarten Sie für den FI-Schalter. Geben Sie einen maximalen und minimalen Wert an. Beziehen Sie sich dabei auf den berechneten Wert aus den vorherigen Übungen, sowie den Abschaltstrom des FI-Schalters. Nehmen Sie die Abbildung 3 zur Hilfe.

6. Welchen FI-Schalter würden Sie für Wohnungen, Gebäude und normalen Betrieben empfehlen?

7. Überlegen Sie sich nun, wie man aktiv einen FI-Schalter in seinem eigenen Haushalt umgehen kann. Testen sie ihre Idee mit Hilfe des Fehlersimulators und dem Typ B FI-Schalter. Was ist der Grundsatz, dass ein FI-Schalter keine gefährlichen Fehlerströme erkennen kann?

8. Bauen Sie den Praktikumsplatz ab und versorgen Sie alle Kabel und Stecker. Desinfizieren Sie zudem alle berührten Flächen.

6 Versuch 5 - Fehlerströme in der Hand (opt.)

Im Fall eines Versagens der Schutzmassnahmen können möglicherweise tödliche Körperströme ungehindert durch den Menschen fliessen. Jedoch auch wirksame Sicherheitsmassnahmen können eine kurzzeitige Einwirkung hoher Berührungsspannungen nicht vollständig vermeiden. Im Umgang mit Elektrizität ist daher eine Sensibilisierung für die Auswirkungen solcher Ströme von grosser Bedeutung.

Im letzten Versuch kann daher auf ausdrücklich freiwilliger Basis der Einsatz der Loslassschwelle sowie das Schmerzempfinden bei für den Menschen ungefährlichen Strömen kleiner 10 mA erprobt werden. Dazu verfahren Sie bitte wie folgt:

- (a) Bitte schliessen Sie den Fehlerstromsimulator über den 10 mA FI-Schalter an die Spannungsversorgung an.
- (b) Schliessen Sie noch nicht den Handkontakt an, sondern führen Sie einen Funktionstest mit Strommessung am beiliegenden Testwiderstand durch. Im Fall einer Nichtabschaltung bei 10 mA ist der Versuch sofort zu beenden. Überprüfen Sie bitte gleichzeitig, dass sich das Potentiometer bei Loslassen auf den Maximalwiderstand zurückstellt.
- (c) Bei erfolgreicher Durchführung von Punkt 2 verbinden Sie nun das Testkabel mit dem Handmodul sowie der Steckdose des FI-Koffers. Vor jedem Versuch ist das beiliegende Armband mithilfe des Wasserhahns zu befeuchten, um einen minimalen Übergangswiderstand zu gewährleisten.
- (d) Jeder Freiwillige darf nun anhand des Potentiometers den Stromfluss durch die Hand einstellen und so, wenn möglich, das Einsetzen der Handverkrampfung sowie den Abschaltstrom ermitteln.

Tabelle 8: Loslass-Schwelle und Abschaltstrom mit Handstrom-Simulator

	Loslass-Schwelle	Auslösung FI-Schalter
Strom in mA		

Sicherheitsanweisungen zum Versuch

Grundsatz Jeder Hochspannungsprüfkreis, der nicht sichtbar geerdet ist, muss als unter Spannung stehend betrachtet werden. Nicht nur die Berührung, sondern schon eine bloße Annäherung kann lebensgefährlich sein. Die zentralen NOT-AUS-Schalter an den Wänden in den Laboratorien dürfen nur in einer echten Notsituation betätigt werden. Sie bewirken eine sofortige Abschaltung der ganzen Laborspeisung und lösen zusätzlich in den Korridoren der Gebäude ETL und ETZ Alarm aus. Damit ist eine rasche und qualifizierte Hilfeleistung durch Mitarbeiter der Fachgruppe sichergestellt. Alle Prüflaboratorien sind mit ausfallsicheren Notleuchten versehen.

Versuchsaufbau Alle nachfolgenden Versuche werden mit der vollen Netzspannung von 230 V (Leiter-Erde) bzw. bis zu 400 V (Leiter-Leiter) bei einer maximalen Stromstärke von 6 A durchgeführt. Auch wenn alle Vorkehrungen getroffen wurden, um die folgenden Versuche so ungefährlich wie möglich zu machen, ist die Versuchsanleitung strikt einzuhalten und den Anweisungen und Sicherheitsvorschriften Folge zu leisten.

Versuchsbetrieb Bitte halten Sie sich daher an folgende Grundregeln:

1. Sämtliche Verkabelungen an der Praktikumsanordnung werden spannungsfrei durchgeführt.
2. Auf keinen Fall dürfen die integrierten Schutzmassnahmen überbrückt werden.
3. Die Einschalterlaubnis wird vom Betreuer erst nach Überprüfung der Verkabelung erteilt. Vorher bleibt die Hauptsicherung abgeschaltet.
4. Bei Verwendung der vorliegenden Messmittel ist ausdrücklich zuvor deren zweckmässige Verkabelung sowie Belastbarkeit zu verifizieren.

Bei Unsicherheiten jeder Art ist unbedingt ein verantwortlicher Mitarbeiter des High Voltage Laboratory beizuziehen!

Literatur

- [1] H. Ris, *Elektrische Installationen und Apparate*. Neftenbach: AZ Fachverlag, 2000.
- [2] “ESTI Unfallstatistik 2010 – 2019,” *Eidgenössisches Starkstrominspektorat EST*, 2019.
- [3] V. Crastan, *Elektrische Energieversorgung I*. Biel und Evillard: Springer-Verlag, 2012.
- [4] K. Heuck, K. Dettmann, and D. Schulz, *Elektrische Energieversorgung*. Hamburg: Springer-Verlag, 2013.
- [5] K. Tkotz, P. Bastian, H. Bumiller, W. Eichler, F. Huber, N. Jaufmann, J. Manderla, O. Spielvogel, F. Stricker, and U. Winter, *Fachkunde Elektrotechnik*. Hof/Kronach: Europa Lehrmittel, 1999.
- [6] “Lernprogramm WBT - Elektrische Schutzmassnahmen,” Denkendorf, 2014.
- [7] I. Kasikci, *Elektrotechnik für Architekten, Bauingenieure und Gebäudetechniker*. Weinheim: Springer-Verlag, 2013.
- [8] “EN 60529 - Schutzarten durch Gehäuse,” Brüssel, 2013.
- [9] “Grundlagenschulung: Fehlerstromschutzschalter,” 2002.
- [10] T. Laasch and E. Laasch, *Haustechnik*. Steinburg und Bad Nauheim: Springer-Verlag, 2013.
- [11] G. Grünebast, “Kein Problem: RCD vor Frequenzumrichter,” *Elektroinstallationen*, no. 10, 2017.
- [12] A. Schwab, *Elektroenergiesysteme*. Karlsruhe: Springer-Verlag, 2012.