

# Isolationsüberwachung von AC/DC-Niederspannungsnetzen

Diplomarbeit



Institut für Elektrische Anlagen  
Technische Universität Graz

Verfasst von

Christoph Sigl

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Schmutzer

Dipl.-Ing. Christian Raunig

Institutsleiter: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I

Telefon: (+43 316) 873 - 7551

Telefax: (+43 316) 873 - 7553

<http://www.ifea.tugraz.at>

<http://www.tugraz.at>

Graz / April - 2012



## **Danksagung**

Ich bedanke mich bei Herrn Dipl.-Ing. Christian Raunig und Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Schmautzer für die Betreuung dieser Diplomarbeit. Diese hatten für meine Anliegen und Fragen immer ein offenes Ohr und standen mir während der gesamten Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern für Ihre Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung. Sie ermöglichten mir durch Ihrer finanzielle Unterstützung eine sorgenfreie Studienzeit und eine wunderbare Zeit während meines Auslandsjahres. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Großeltern für Ihre finanziellen Zuwendungen.

Großer Dank gebührt auch meinem treuen Freund Andreas.

Weiters bedanken möchte ich mich auch bei allen Freunden und WohnungskollegenInnen mit denen ich eine unvergessliche Studentenzzeit erlebt habe.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 17.04.2012

Vorname Nachname

## **Kurzfassung**

Titel: Isolationsüberwachung von AC/DC-Niederspannungsnetzen

Schlüsselwörter: IT-Netz, Isolationsüberwachung, Erdkapazität, kapazitiver Fehlerstrom

Isolierte Netze zeichnen sich durch eine besonders hohe Verfügbarkeit aus. Bei dieser Netzform ist der Sternpunkt nicht geerdet und damit fließt im ersten Fehlerfall (Erdschluss/ Isolationsfehler) der meist nur geringe kapazitive Fehlerstrom. Deswegen dürfen diese Netze beim ersten Fehlerfall weiterbetrieben werden.

Mit dieser Diplomarbeit werden einige wichtige Fragenstellungen für den sicheren Betrieb eines IT-Netzes bearbeitet. Dafür wurden verschiedene Normen durchgearbeitet und die darin enthaltenen Anforderungen/Bedingungen an solche Netze näher betrachtet. Weiters wurde die maximale Netzlänge eines isolierten Niederspannungsnetzes in Abhängigkeit des Erdkapazitätsbelags und des Anlagenerders ermittelt. Ein entsprechender Laboraufbau wurde angefertigt, um ein isoliertes Netz zu simulieren. An diesem wurden verschiedene Messungen durchgeführt, unter anderem auch zum Verhalten von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs) in IT-Netzen. Zusätzlich wurden verschiedene Isolationsüberwachungseinrichtungen getestet und deren Anwendbarkeit evaluiert.

## **Abstract**

Title: Insulation monitoring of AC/DC low voltage networks

Keywords: isolated neutral system, insulation monitoring, earth capacitance, capacitive fault current

The advantage of isolated neutral systems is their high availability. The neutral point of the earthing system is not connected to earth and therefore a low fault current is flowing in the first fault situation (earth/insulation fault). For this reason this earthing system can be kept in operation during a single earth fault.

The contents of this diploma thesis are questions concerning the safe operation of isolated neutral systems. At the beginning different national standards were searched for requirements and conditions in case of a single earth fault. Furthermore, calculations were executed to obtain the maximum possible extension for a low voltage unearthed system as a function of earth capacitance per km and equipment earthing. Afterwards a laboratory setup was made to simulate an unearthed system. By using this laboratory setup the behaviour of residual current devices (RCDs) in a first fault situation was obtained. Afterwards three different insulation monitoring devices were tested to figure out their function, advantages and disadvantages.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>9</b>
<b>1 Kurzfassung</b>	<b>11</b>
1.1 Ziel . . . . .	11
1.2 Methode . . . . .	11
1.3 Ergebnisse . . . . .	11
1.4 Schlussfolgerung und Ausblick . . . . .	12
<b>2 Einleitung</b>	<b>13</b>
2.1 Forschungsfragen . . . . .	13
2.2 Erkenntnisinteresse . . . . .	14
2.3 Methode . . . . .	14
<b>3 Allgemeines</b>	<b>16</b>
3.1 Einführung . . . . .	16
3.2 Schutzmaßnahmen in elektrischen Netzen . . . . .	17
3.2.1 Schutz gegen elektrischen Schlag . . . . .	18
3.2.2 Schutz gegen thermische Einflüsse . . . . .	21
3.2.3 Arten der Netzsysteme . . . . .	21
3.3 Schutzmaßnahmen im TT-System . . . . .	25
3.4 Schutzmaßnahmen im TN-System . . . . .	27
3.4.1 Ausschaltbedingung in Verteilungsnetzen . . . . .	28
3.4.2 Ausschaltbedingung für Verteilungsleitungen in Verbraucheranlagen und für Endstromkreise mit Überstrom-Schutzeinrichtungen mit ei- nem Nennstrom über 32 A . . . . .	28
3.4.3 Ausschaltbedingung für Endstromkreise mit einem Nennstrom bis ein- schließlich 32 A . . . . .	28
3.4.4 Ausschaltstromfaktor . . . . .	28
3.4.5 Ausschaltung mittels Fehlerstrom-Schutzeinrichtung . . . . .	29

3.4.6	Maßnahmen bei Nichteinhaltung der Ausschaltbedingungen . . . . .	29
3.5	Schutzmaßnahmen im IT-System . . . . .	30
3.5.1	Abschaltbedingungen im ersten Fehlerfall nach DIN VDE 0100-410 . . . . .	31
3.5.2	Abschaltbedingungen im zweiten Fehlerfall nach DIN VDE 0100-410 . . . . .	32
3.6	Das IT-System . . . . .	34
3.6.1	Vorteile von IT-Systemen . . . . .	34
3.7	Gegenüberstellung von IT- und TT/TN-Netzen . . . . .	37
3.7.1	Der Fehlerstrom im Erdschlussfall . . . . .	37
3.7.2	Spannungsverlagerung im Fehlerfall . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Laboraufbau</b>	<b>45</b>
4.1	Berechnung von $C'$ , $L'$ und $R'$ . . . . .	46
4.1.1	Der Kapazitätsbelag $C'$ . . . . .	46
4.1.2	Der Induktivitätsbelag $L'$ . . . . .	48
4.1.3	Der Widerstandsbelag $R'$ . . . . .	49
4.2	Der Laboraufbau . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Berechnung und Simulation</b>	<b>51</b>
5.1	Simulation eines IT-Netzes in Matlab-Simulink . . . . .	52
5.2	Kapazitiver Fehlerstrom am Laboraufbau . . . . .	53
5.3	Vergleich der ermittelten Fehlerströme . . . . .	54
5.4	Maximale Ausdehnung von IT-Netzen . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Messergebnisse</b>	<b>59</b>
6.1	Die untersuchten Isolationsüberwachungssysteme . . . . .	59
6.1.1	Widerstandsschaltung für DC-Netze . . . . .	59
6.1.2	220-V-DC-Systemüberwachung der Firma IMB . . . . .	61
6.1.3	IRDH575B1-435 der Firma Bender . . . . .	62
6.2	Erfassungszeit eines Erdschlusses im DC IT-Netz . . . . .	70
6.2.1	Messverfahren . . . . .	70
6.2.2	Messergebnisse . . . . .	72
6.3	Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen in IT-Netzen . . . . .	75
6.3.1	Funktionsweise von RCDs in wirksam geerdeten Netzen . . . . .	75
6.3.2	Untersuchungen zum Verhalten von RCDs in IT-Netzen . . . . .	79
6.3.3	Erkenntnisse . . . . .	91
<b>7</b>	<b>Prüfung von elektrischen Anlagen</b>	<b>92</b>



7.1	ÖVE/ÖNORM E8001, Teil 6-61: Prüfungen - Erstprüfungen (2001) . . . . .	92
7.2	DIN VDE 0100-600 Teil 6: Prüfungen (2008) . . . . .	93
<b>8</b>	<b>Diskussion</b>	<b>96</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>99</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>102</b>

# Abkürzungsverzeichnis

$a$	Abstand zwischen zwei Leitern in mm
$c$	Abstand Mittelpunkt des Kabels - Mitte einer Ader in mm
$C'_0$	Nullkapazitätsbelag in $\mu\text{F}/\text{km}$
$C'_b$	Betriebskapazitätsbelag in $\mu\text{F}/\text{km}$
$C_E$	Kapazität der Leiter gegen Erde in $\mu\text{F}$
$C'_E$	Kapazitätsbelag zwischen Leiter und Erde in $\mu\text{F}/\text{km}$
$C_{E\max}$	maximale Netzableitkapazität in $\mu\text{F}$
$C'_K$	Koppelkapazitätsbelag zwischen den Leitern in $\mu\text{F}/\text{km}$
$C'_L$	Kapazitätsbelag zwischen zwei Leitern in $\mu\text{F}/\text{km}$
$f$	Frequenz in Hz
$G'$	Ableitungsbelag in $1/\text{M}\Omega\text{km}$
HPA	Hauptpotenzialausgleich
$I_A$	Ausschaltstrom der vorgeschalteten Schutzeinrichtung
$I_B$	Körperstrom in A
$I_{CE}$	kapazitiver Strom in A
$I_d$	Fehlerstrom im ersten Fehlerfall in A
$I_{\Delta N}$	Nennwert des Auslösefehlerstromes (Nennfehlerstrom) der Fehlerstrom - Schutzeinrichtung in A
$I_f$	Fehlerstrom in A
$I_k$	Kurzschlussstrom in A
$I_N$	Nennstrom der vorgeschalteten Schutzeinrichtung
IÜW	Isolationsüberwachungssystem
IT-Netz	isoliertes Netz
$l$	Netzlänge in km
$L'$	Induktivitätsbelag in $\text{mH}/\text{km}$
$l_{\max}$	maximale Länge eines IT-Netzes, damit die Bedingung (5.2) eingehalten wird
$m$	Ausschaltstromfaktor
N-Leiter	Neutralleiter

PE-Leiter	....	Schutzleiter
PEN-Leiter	..	Neutralleiter und Schutzleiter in einem Leiter kombiniert
$R'$	.....	Widerstandsbelag in $\Omega/\text{km}$
$r_1$	.....	Abstand Leiter - Schirm in mm
$R_A$	.....	Erdungswiderstand des Anlagenerders in $\Omega$
$R_B$	.....	Erdungswiderstand des Betriebserders in $\Omega$
RCD	.....	Fehlerstromschutzeinrichtung
RCM	.....	Differenzstromüberwachungseinrichtung
$R_F$	.....	Isolationswiderstand im Fehlerfall in $\Omega$
$r_L$	.....	Radius des Leiters in mm
$U$	.....	Außenleiternennspannung in V
$U'$	.....	Nennspannung zwischen Außen- und Neutralleiter in V
$U_{FL}$	.....	vereinbarter Grenzwert der Fehlerspannung in V
$U_L$	.....	zulässige Berührungsspannung in V
$U_N$	.....	Nennspannung gegen Erde in V
$Z_{<}$	.....	Isolationsüberwachungseinrichtung
$Z_S$	.....	Schleifenimpedanz im Fehlerfall in $\Omega$
$\epsilon_0$	.....	Permittivität des Vakuums in F/m
$\epsilon_r$	.....	relative Permittivität
$\mu_0$	.....	Permeabilität des freien Raums in H/m
$\pi$	.....	Kreiszahl
$\omega$	.....	Kreisfrequenz in 1/s
$\rho$	.....	Ersatzradius des Leiters in mm

# 1 Kurzfassung

## 1.1 Ziel

Mit dieser Diplomarbeit sollen wichtige Fragen zum Thema „isolierte Niederspannungsnetze“ und der sichere Betrieb von solchen Systemen geklärt werden. Dafür werden die für ein isoliertes Netz (IT-Netz) wichtigen Themen „Wann darf dieses im ersten Fehlerfall weiterbetrieben werden“, „Maximale Ausdehnung“, „Verhalten von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs)“ und „Prüfung“ betrachtet und geklärt. Somit soll ein Überblick für die Bedingungen und Anforderungen an isolierte Systeme geschaffen werden, welche speziell für Betreiber eine schnelle Evaluierung ihres Netzes nach diesen Kriterien ermöglichen soll.

## 1.2 Methode

Zu den vorher genannten Fragestellungen wurden zu Beginn verschiedene nationale Normen beleuchtet und verglichen. Danach wurden Berechnungen und Simulationen in Matlab-Simulink durchgeführt. Zum Schluss wurde ein Laboraufbau angefertigt, der ein isoliertes Netz simuliert, um verschiedene Messungen durchführen zu können.

## 1.3 Ergebnisse

Nach dem Durcharbeiten der österreichischen Normen wurde festgestellt, dass diese im Hinblick auf Bedingungen/Anforderungen im IT-Netz nur wenig konkrete Informationen aufweisen. Bei der maximalen möglichen Ausdehnung von 3ph-AC-IT-Netzen mit  $U_N = 230 \text{ V}$ , werden bei kleinem Anlagenwiderstand  $R_A$  die Grenzen hinsichtlich Weiterbetrieb des Netzes im ersten Fehlerfall bei üblichen Netzlängen nicht erreicht. Der Einsatz von RCDs als Zusatzschutz, ist je nach Netzausdehnung und -topologie oft nicht zielführend, da diese durch den Fehlerstrom im ersten Fehlerfall ausgelöst werden können.

## 1.4 Schlussfolgerung und Ausblick

Die ÖVE/ÖNORM E 8001-1 sollte speziell im Hinblick auf Bedingungen zum Weiterbetrieb von isolierten Netzen im ersten Fehlerfall erweitert werden. Auch auf die Prüfung von IT-Netzen sollte in der Norm detaillierter eingegangen werden. Speziell bei größeren IT-Netzen ist es wichtig, auch den Erdkapazitätsbelag  $C_E'$  zu ermitteln, um genaue Aussagen hinsichtlich der maximal mögliche Netzausdehnung treffen zu können. Weiters kann der Einsatz von RCDs als Zusatzschutz nur in isolierten Systemen mit geringer Ausdehnung empfohlen werden, wenn der Vorteil der hohen Verfügbarkeit keine entscheidende Rolle spielt.

## 2 Einleitung

In diesem Kapitel wird zuerst auf die Forschungsfragen, die mit dieser Diplomarbeit beantwortet werden sollen, eingegangen. Danach wird erklärt weswegen diese Erkenntnisse von Interesse sind und die Methoden erläutert, nach denen bei dieser Arbeit vorgegangen wurde.

### 2.1 Forschungsfragen

In den verschiedenen Vorschriftenwerken gibt es keine konkreten Angaben zur Netzgröße von isolierten Netzen (IT-Netzen), deswegen soll mit dieser Diplomarbeit unter anderem erarbeitet werden, wo die Grenzen für den sicheren Betrieb eines IT-Netzes liegen. Dabei soll geklärt werden, wie groß ein ungeerdetes System bei unterschiedlichen Einsatzgebieten werden darf, damit die zulässige Berührungsspannung im ersten Fehlerfall (Isolationsfehler/Erdschluss) nicht überschritten wird und somit keine Gefahr für Personen besteht. Dabei stellt auch die Prüfung von IT-Netzen eine große Rolle dar. Hier soll ein Blick auf die in den Normen erstellten Richtlinien und deren praktische Relevanz geworfen werden.

Ein weiteres Aufgabengebiet ist die Gegenüberstellung und Evaluierung von verschiedenen Isolationsüberwachungssystemen (IÜW) an Hand der Messergebnisse, die am eigens erstellten Laboraufbau ermittelt werden. Mit diesen Ergebnissen sollen dann Verbesserungsvorschläge für die Isolationsüberwachung erarbeitet werden.

Das Verhalten von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs) in isolierten Netzen stellt ein weiteres Aufgabengebiet dar. Hier soll zuerst festgestellt werden, unter welchen Umständen RCDs in IT-Netzen eingesetzt werden dürfen. Danach soll am Laboraufbau das Auslöseverhalten von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen untersucht werden. Auch das Zusammenspiel von IÜW und RCDs wird untersucht. Mit diesen Ergebnissen soll dann eine Empfehlung zum Einsatz von RCDs in IT-Netzen erstellt werden.

## 2.2 Erkenntnisinteresse

Für die Betreiber von ungeerdeten Systemen sind die Erkenntnisse dieser Diplomarbeit für den sicheren Betrieb ihres Versorgungsnetzes von entscheidender Bedeutung. Damit können diese schnell evaluieren, ob ihr System den Anforderungen entspricht und somit keine Gefahr für ihre MitarbeiterInnen oder andere Personen im ersten Fehlerfall besteht.

Der Einsatz von RCDs in isolierten Netzen kann, bei entsprechenden Gegebenheiten, eine Möglichkeit zur Realisierung des Zusatzschutzes sein. An Hand der Empfehlungen zum Einsatz von RCDs in Netzen mit isoliertem Sternpunkt kann bei der Projektierung solcher Systeme schnell entschieden werden, ob ein Einsatz dieser Schutzeinrichtungen sinnvoll ist oder nicht.

Allgemein kann gesagt werden, dass es in der Literatur nur spärlich Informationen hinsichtlich sicherem Betrieb, Prüfung oder auch möglicher Ausdehnung von IT-Netzen gibt. Mit dieser Diplomarbeit wird damit eine Zusammenfassung von einigen wichtigen Fragen in Zusammenhang mit isolierten Systemen geschaffen. Mit der Betrachtung und Ausarbeitung der Normen in Österreich und Deutschland und den durchgeführten Messungen kann somit ein guter Überblick zum Thema isoliertes Netz geschaffen werden.

## 2.3 Methode

Für einen allgemeinen Überblick wurden zuerst die Normen aus Österreich und Deutschland betrachtet, um die Richtlinien, die in einem IT-Netz einzuhalten sind, herauszuarbeiten. Danach wurde ein Laboraufbau angefertigt, der ein reales IT-System simuliert, welcher eine wesentliche Grundlage darstellte, um die vorher beschriebenen Ziele und Erkenntnisse zu erreichen.

Mit Hilfe des Laboraufbaus konnten verschiedene Szenarien, wie unterschiedliche Netzgrößen und -topologien, aber auch verschiedene Werte für den Anlagenerder sowie Isolationsfehler, simuliert werden. Mit den ermittelten Ergebnissen wurden die Grenzen von ungeerdeten Systemen aufgezeigt. Weiters wurden an diesem verschiedene IÜW getestet, und an Hand der erzielten Messergebnisse wurden diese verglichen und ihre Anwendbarkeit evaluiert. Danach wurde mit Hilfe von Matlab-Simulink ein IT-Netz simuliert. Die Ergebnisse aus diesem Simulationsmodell wurden dann mit den Ergebnissen am Laboraufbau und der Berechnungen

verglichen und bewertet.

Im Labor wurde ebenfalls das Verhalten von RCDs in isolierten Netzen untersucht. Auf Basis der Messergebnisse wurden Empfehlungen zum Einsatz von RCDs als Zusatzschutz in IT-Systemen erstellt.

Zum Schluss wurde die Thematik „Prüfung von elektrischen Anlagen“ hinsichtlich IT-Netzen betrachtet.

## 3 Allgemeines

In diesem Kapitel wird zu Beginn eine Einführung zur Thematik isolierte Netze (IT-Netz) gegeben. Danach werden die Schutzmaßnahmen in elektrischen Anlagen erklärt und dann wird im speziellen auf die Schutzmaßnahmen in isolierten Niederspannungsnetzen eingegangen.

### 3.1 Einführung

Ein Isolationsfehler führt im ungünstigsten Fall in der Folge zu einer Unterbrechung der Stromversorgung. Damit kann etwa der laufende Betrieb in einem Unternehmen unterbrochen werden und dies kann zu einem Produktionsausfall führen. Der große Vorteile von isoliert betriebenen Netzen ist die hohe Versorgungssicherheit, da diese Systeme im ersten Fehlerfall (Erdschluss/Isolationsfehler) weiterbetrieben werden dürfen. Diese besondere Eigenschaft ergibt sich dadurch, da bei dieser Netzform der Systemsternpunkt nicht geerdet sondern isoliert ausgeführt ist und damit im ersten Fehlerfall nur der meist geringe kapazitive Fehlerstrom fließt. Aus diesem Grund dürfen diese Netze im ersten Fehlerfall weiterbetrieben werden. Isolierte Netze (IT-Netze) werden daher vorwiegend dort eingesetzt, wo hohe Anforderungen an die Versorgungssicherheit gestellt werden. Stark verbreitet ist es im medizinischen Bereich, z.B. in Krankenhäusern, aber auch im Bergbau, in Umspannwerken, bei Industrieanlagen, bei der Notstromversorgung und in Schiffen oder Schienenfahrzeugen.

Um die Sicherheit in einem solchen Netz zu gewährleisten, werden Isolationsüberwachungssysteme (IÜW) eingesetzt, welche den Isolationswiderstand des zu überwachenden Netzes ständig überprüfen. Wird ein bestimmter voreingestellter Isolationswert unterschritten, muss das IÜW dies akustisch oder optisch melden. Neue Isolationsüberwachungssysteme sind mit einer automatischen Fehlererkennung ausgestattet, welche im Fehlerfall die Fehlerstelle lokalisiert, um eine möglichst schnelle Behebung des Fehlers zu ermöglichen.

Der sichere Betrieb eines isolierten Netzes mit Wechselspannung (AC) kann im ersten Fehlerfall nur gewährleistet werden, wenn der kapazitive Fehlerstrom (Ableitstrom) bestimmte

Grenzen nicht überschreitet. Steigt der kapazitive Fehlerstrom aber an, kann der vereinbarte Grenzwert der Fehlerspannung überschritten werden. Ist dies der Fall, muss der fehlerbehaftete Anlagenteil abgeschaltet werden (mehr dazu in Kapitel 3.5). Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Netzausdehnung, da mit steigender Größe eines Netzes auch der kapazitive Ableitstrom ansteigt. Das Problem dabei ist, dass die Normen zu diesem Thema kaum konkrete Angaben machen. Ein weiteres Problem stellt die automatische Fehlererkennung bei mit Gleichspannung (DC) betriebenen IT-Netzen dar.

Aus diesem Anlass wurden mit dieser Diplomarbeit folgende Punkte bearbeitet:

1. Vergleich und Gegenüberstellung der verschiedenen Normen im Hinblick auf IT-Netze.
2. Inwieweit können IT-Netze ohne Gefahr im ersten Fehlerfall weiterbetrieben werden und Klärung weiterer offener Fragen zum sicheren Betrieb eines IT-Netzes.
3. Testen verschiedener Isolationsüberwachungssysteme an einem Laboraufbau, Gegenüberstellung dieser und Evaluierung der Anwendbarkeit. Aus diesen Erkenntnissen wurden dann Verbesserungsvorschläge zum Einsatz der einzelnen IÜW erarbeitet.
4. Verhalten von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen in isolierten Netzen.
5. Betrachtung der Thematik Prüfung von elektrischen Anlagen in IT-Netzen.

## 3.2 Schutzmaßnahmen in elektrischen Netzen

Durch den Betrieb von elektrischen Geräten oder Anlagen besteht die Gefahr, dass Personen im Fehlerfall der elektrischen Anlage oder des Betriebsmittels durch elektrischen Strom zu Schaden kommen. Damit dies nicht geschieht, finden sich viele Sicherheitsanforderungen in Vorschriftenwerken auf internationaler und nationaler Ebene. In dieser Diplomarbeit wird aber nur auf die Anforderungen in der österreichischen und deutschen Norm eingegangen.

In Österreich ist dazu unter anderem die ÖVE/ÖNORM E 8001-1 zu beachten, die sich mit der „Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V“ beschäftigt. „Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen)“ wird in den folgenden Kapiteln näher betrachtet.

Bei Thematiken, zu welchen diese österreichische Norm keine konkreten Angaben oder Aussagen macht, wird auf die deutsche Norm DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410) „Errichten

von Niederspannungsanlagen – Teil 4-41: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag“ eingegangen.

### 3.2.1 Schutz gegen elektrischen Schlag

Die Auswirkung des elektrischen Stroms auf den menschlichen Körper hängt von der Höhe des Körperstroms  $I_B$  und der Durchströmungsdauer  $t$  ab. In Abb. 3.1 sind die unterschiedlichen Gefährdungszonen bei Durchströmung des Körpers mit Wechselstrom dargestellt.

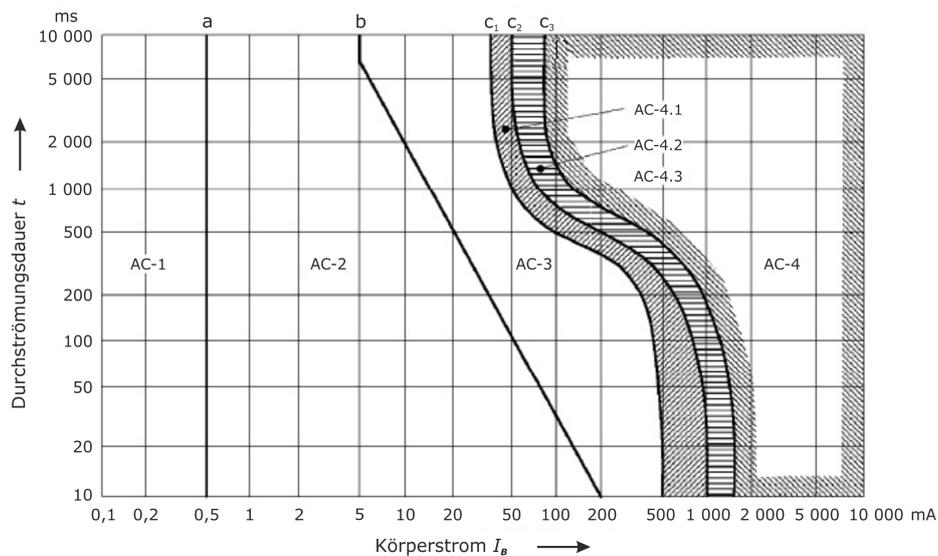


Abbildung 3.1: Gefährdungsbereiche (Strom - Zeit) bei Wechselstrom (15 bis 100 Hz); Quelle [1]

Tabelle 3.1 erklärt, wie der Mensch in den einzelnen Gefährdungszonen reagiert.

AC-1	Wahrnehmung möglich, aber in der Regel keine Schreckreaktion
AC-2	Wahrnehmung und unwillkürliche Muskelkontraktionen wahrscheinlich, aber in der Regel keine schädlichen physiologischen Wirkungen
AC-3	Im allgemeinen keine organischen Schäden zu erwarten, aber starke unwillkürliche Muskelkontraktionen; Atemschwierigkeiten; reversible Störungen der Herzfunktion
AC-4	Herzkammerflimmern mit steigender Wahrscheinlichkeit, Atemstillstand, Verbrennungen, andere Zellschäden
AC-4.1	Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern kleiner 5 %
AC-4.2	Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern kleiner 50 %
AC-4.3	Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern größer 50 %

Tabelle 3.1: Wirkungen von Wechselströmen auf den menschlichen Körper (15 bis 100 Hz); Quelle [1]

Um diese Gefahren zu verhindern, wird mit den Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag vermieden, dass ein gefährlicher elektrischer Strom durch den menschlichen Körper oder den Körper eines Tieres fließt. Dies wird durch Einhaltung des dreistufigen Schutzkonzeptes der Schutzmaßnahmen nach [5, Abschnitt 3.8] erreicht. Mit diesem soll sichergestellt werden, dass weder im Normalbetrieb, noch bei einem eintretenden Fehler Gefahr für den Menschen oder für Tiere besteht. Die Abb. 3.2 zeigt den Aufbau des Schutzkonzeptes.

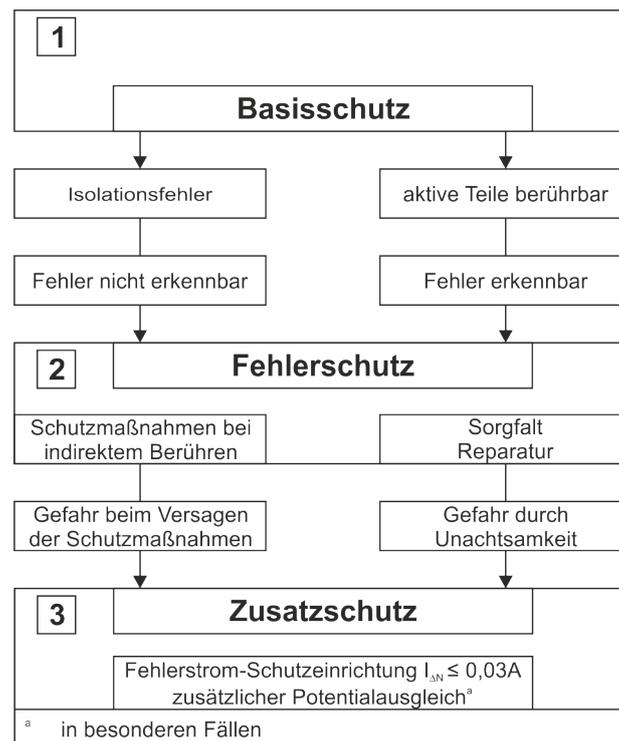


Abbildung 3.2: Maßnahmen für den Schutz gegen elektrischen Schlag; Quelle: [5]

### 3.2.1.1 Basisschutz

Der Basisschutz dient als Schutz gegen direktes Berühren von aktiven Leitern. Darunter sind alle Maßnahmen zu verstehen, „die das gefährbringende Annähern von Personen oder Nutztieren an aktive Teile elektrischer Betriebsmittel oder das direkte Berühren derselben verhindern“ [5]. Dies kann erreicht werden durch Basisisolierung, Abdeckungen, Umhüllungen, Hindernisse oder Abstand zu den aktiven Teilen.

Eine Ausnahme davon bilden Stromkreise, in denen die Spannung nach den Bestimmungen der Schutz- und Funktionskleinspannung mit sicherer elektrischer Trennung erzeugt wird, und diese Werte von **50V AC** bzw. **120V DC** nicht übersteigt [5].

### 3.2.1.2 Fehlerschutz

Der Fehlerschutz dient zum Schutz bei indirekten Berühren. Unter indirektem Berühren versteht man die Gefahren, die sich im Fehlerfall aus einer Berührung mit Körpern (Gehäusen) oder fremden leitfähigen Teilen ergeben können [5]. Der Schutz wird durch Ausschaltung<sup>1</sup> oder Meldung der Schutzeinrichtung erreicht. Dazu gehören z.B. Überstrom- und Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen oder IÜW. Werden als Fehlerschutz die Nullung oder die Fehlerstrom-Schutzschaltung angewendet, beträgt der vereinbarte Grenzwert der Fehlerspannung  $U_{FL}$  (gilt in Österreich):

- Wechselspannungen (15 Hz bis 1000 Hz):  $U_{FL} = 65 \text{ V}$
- Gleichspannungen bis 10 % Welligkeit mit Nennspannungen bis 440 V:  $U_{FL} = 120 \text{ V}$ ,

wobei für besondere Anwendungsfälle auch niedrigere Werte vorgeschrieben werden können [5]. Ein Fehlerschutz ist erforderlich, um zu hohe Berührungsspannungen im Falle eines Fehlers zu verhindern. Dabei ist die Dimensionierung des jeweiligen Fehlerschutzes vom verwendeten Netzsystem (siehe Kapitel 3.2.3) abhängig.

Durch die Schutzmaßnahme „automatische Abschaltung<sup>2</sup>“ wird bei Auftreten eines Fehlers das Bestehenbleiben gefährlicher Berührungsspannungen durch Schutzeinrichtungen verhindert. Dies erfordert aber die Koordinierung des Leitungssystems, der Erdung und der Schutzeinrichtung, die in der vorgeschriebenen Abschaltzeit (siehe Tab. 3.3) den fehlerhaften Anlagenteil abschalten muss [6]. Dazu müssen die Körper der einzelnen Betriebsmittel über einen Schutzleiter miteinander verbunden sein.

Der Schutz durch Abschaltung erfordert einen Hauptpotenzialausgleich (HPA), durch den alle leitfähigen Teile im Gebäude wie Haupterdungsleiter, Potenzialausgleichsleiter von Blitzschutzender, Hauptschutzleiter, Wasser- und Gasrohre und andere metallene Rohre und Gebäudekonstruktionen miteinander niederohmig verbunden sind.

In IT-Systemen ist bei Auftreten des ersten Fehlers (Isolationsfehler/Erdschluss) die automatische Abschaltung nicht erforderlich, da der Fehlerstrom meist nur gering ist. Erst bei Auftreten eines Folgefehlers/Doppelerdschluss gelten, je nach Art der Erdung der Körper, die Abschaltbedingungen wie im TN- oder TT-System [6].

---

<sup>1</sup>Der Begriff „Ausschaltung“ wird nur in der österreichischen Norm verwendet

<sup>2</sup>Der Begriff „Abschaltung“ wird nur in der deutschen Norm verwendet

### 3.2.1.3 Zusatzschutz

Der Zusatzschutz ist eine ergänzende Maßnahme, die zum Schutz von Personen und Nutztieren vor Gefahren dient, die sich ergeben können, wenn der Basisschutz und/oder der Fehlerschutz nicht wirksam sind/ist. „Dies wird gemäß den jeweiligen Anforderungen durch den Einbau von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen mit einem Nennfehlerstrom  $I_{\Delta N} \leq 0,03 \text{ A}$  und/oder durch einen zusätzlichen Potenzialausgleich erreicht“ [5].

Einen zusätzlichen lokalen Potenzialausgleich schreibt die Norm für Sonderanlagen wie z.B. Sanitärräume oder Anlagen mit einer Nennspannung höher als 230 V gegen Erde vor. In den zusätzlichen Potenzialausgleich müssen alle gleichzeitig berührbaren Körper von Betriebsmitteln und berührbaren fremden leitfähigen Teile miteinbezogen werden, wenn möglich auch die Bewehrung der Stahlbetonkonstruktion von Gebäuden. Dabei müssen die Schutzleiter aller Betriebsmittel mit dem Potenzialausgleichssystem verbunden werden.

### 3.2.2 Schutz gegen thermische Einflüsse

Gegen unzulässige Erwärmung, die durch Überlast- und Kurzschlussströme entstehen können, müssen alle elektrischen Anlagen/Betriebsmittel einen Schutz aufweisen, damit keine Gefahr für Personen, Tiere oder Sachen durch diese besteht [5]. Die dafür geeigneten Schutzeinrichtungen müssen dabei für die rechtzeitige Ausschaltung des überlasteten Anlagenteils oder Betriebsmittels sorgen. Im Gegensatz zum Fehlerschutz unterliegt der Überlast- und Kurzschlusschutz bei allen Systemen den gleichen Dimensionierungsregeln und ist somit vom jeweiligen Netzsystem (siehe Kapitel 3.2.3) unabhängig.

### 3.2.3 Arten der Netzsysteme

Wie schon erwähnt, hängt die Art der Schutzmaßnahme vom jeweiligen Netzsystem ab. Es gibt drei Hauptgruppen, welche nach der Art der Erdverbindung der Stromquelle und der Verbraucher unterschieden werden. Die Kurzbezeichnung der einzelnen Systeme besteht aus zwei Buchstaben, wobei der erste Auskunft über die Erdungsverhältnisse des Versorgungssystems gibt und der zweite über die Erdungsverhältnisse der Körper der elektrischen Betriebsmittel [5, Abschnitt 3.1.2]. Die Netzsysteme sind dabei durch folgende Kurzzeichen gekennzeichnet:

**Erster Buchstabe:** Erdungsverhältnisse der Stromquelle

- T      Direkte Erdung über einen oder mehrere Betriebserder

- I Isolierung aller aktiven Teile von Erde oder Verbindung eines Systempunktes mit einer hochohmigen Impedanz mit Erde oder eine offene Erdung

**Zweiter Buchstabe:** Erdungsverhältnisse der Körper der elektrischen Betriebsmittel

- T Direkte Erdung des Körpers (Anlagenerder), jedoch unabhängig von den etwa bestehenden Erdungen der Stromquelle
- N Direkte Verbindung der Körper mit der Betriebserdung der Stromquelle

Somit ergeben sich 3 verschiedene Netzsysteme:

- TT-System
- TN-System
- IT-System

Im TN-System wird zusätzlich unterschieden, wie die Verbindungsleitung vom Körper zur Erdung der Spannungsquelle ausgeführt ist. Die weiteren Buchstaben, die zur Unterscheidung der verschiedenen TN-Systeme dienen, sind:

**Weitere Buchstaben:** Anordnung des Neutralleiters und des Schutzleiters

- S Neutralleiter (N-Leiter) und Schutzleiter (PE-Leiter) sind als getrennte Leiter geführt
- C Neutralleiter und Schutzleiter sind kombiniert als ein gemeinsamer Leiter geführt (PEN-Leiter)

Damit können 3 Arten von TN-Systemen unterschieden werden:

- TN-S Im gesamten Netz sind der Schutz- und der Neutralleiter getrennt geführt.
- TN-C Die Funktion von Schutz- und Neutralleiter sind überall in einem einzigen Leiter (PEN-Leiter) zusammengefasst.
- TN-C-S Die Funktionen von Schutzleiter und Neutralleiter sind nur in einem Teil des Netzes in einem einzigen Leiter (PEN-Leiter) zusammengefasst, im übrigen Teil des Netzes werden beide Leiter getrennt geführt.

Den Aufbau der unterschiedlichen Netzsysteme zeigen Abb. 3.3 und 3.4.

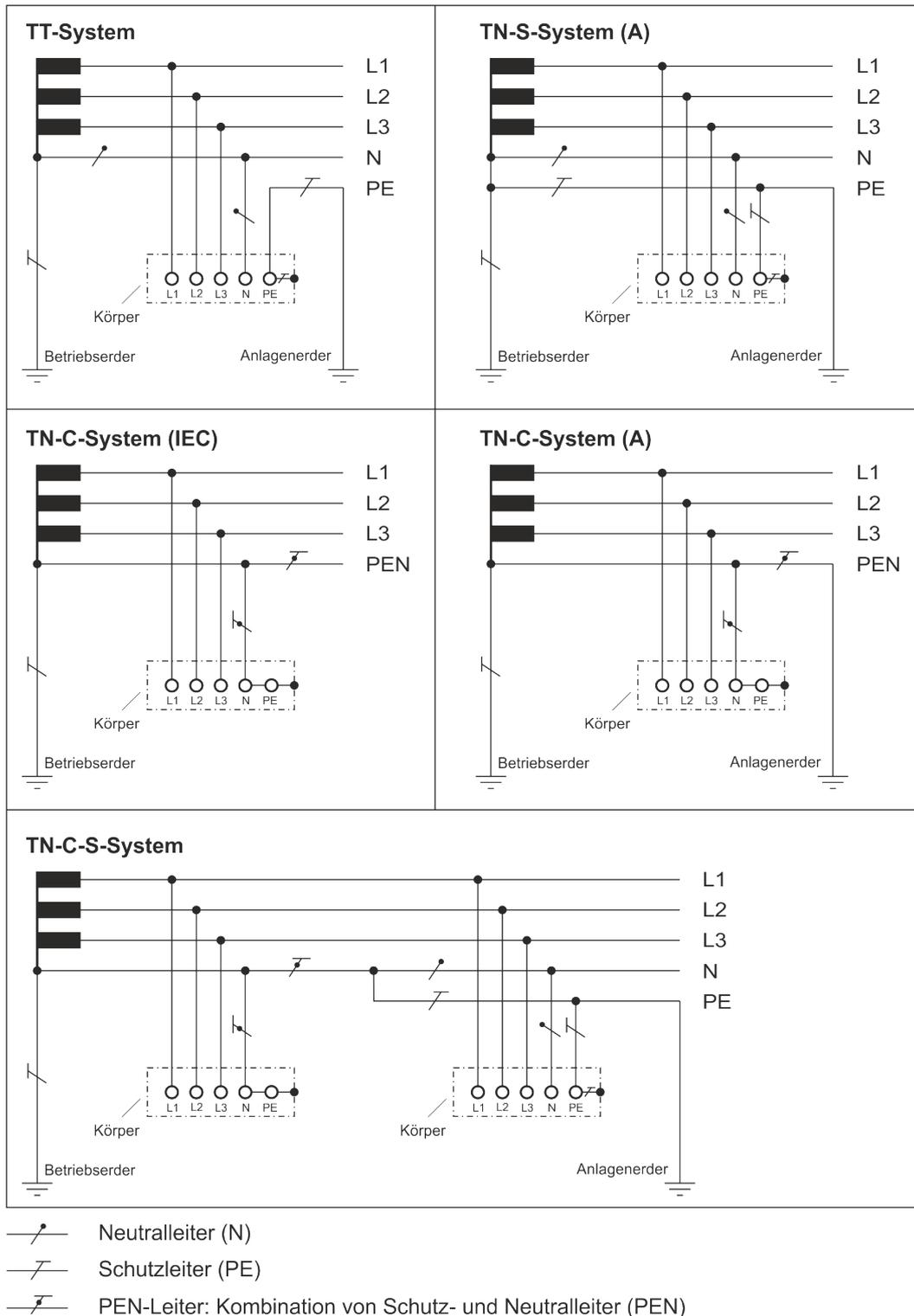


Abbildung 3.3: Prinzipdarstellung der verschiedenen mit Erde verbundenen Netzsysteme; Quelle [5], angepasst

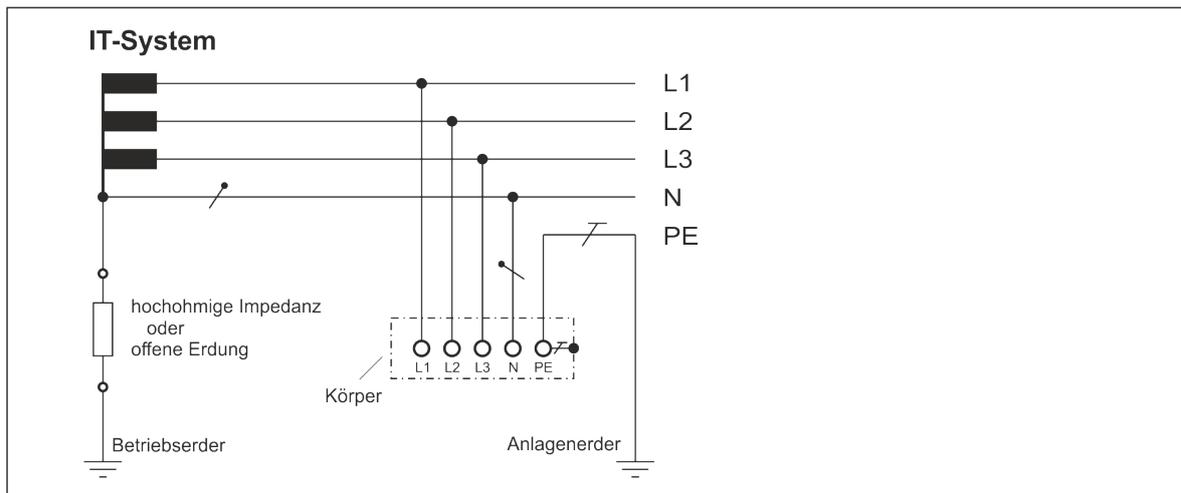


Abbildung 3.4: Prinzipdarstellung des IT-Systems; Quelle [5], angepasst

### 3.3 Schutzmaßnahmen im TT-System

Im TT-System ist ein Punkt (ein Systemleiter) über einen Betriebserder niederohmig geerdet. Die Körper der elektrischen Verbraucheranlagen sind mit Erden verbunden, die vom Betriebserder getrennt sind [5, Abschnitt 3.1.2]. Außerdem müssen alle Körper, die durch die gleiche Schutzeinrichtung geschützt werden, durch einen Schutzleiter an einem gemeinsamen Erder angeschlossen sein.

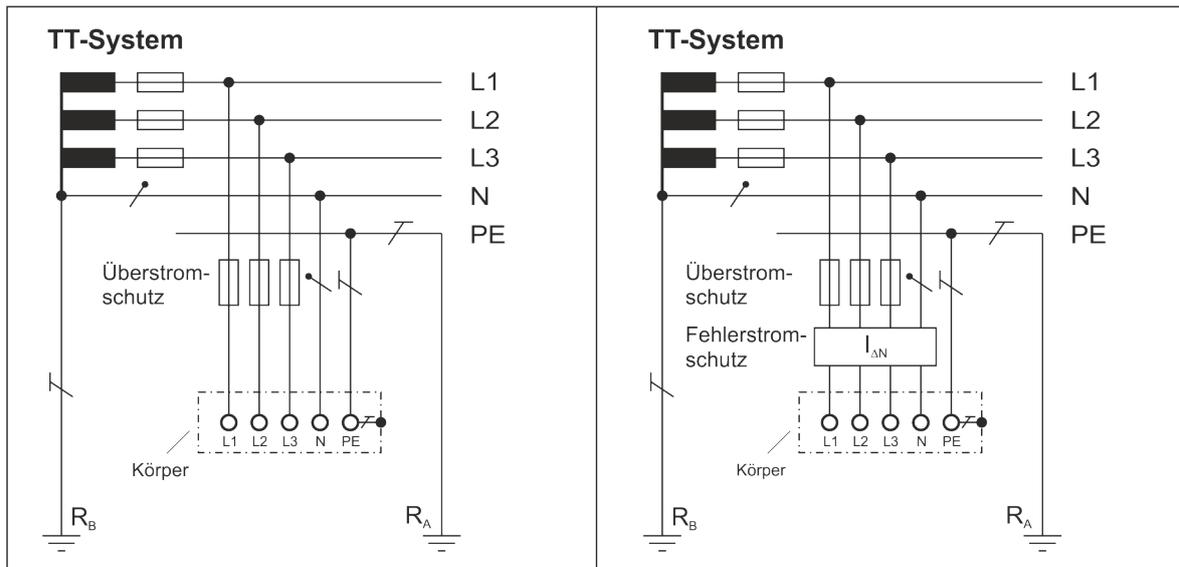


Abbildung 3.5: TT-System mit Schutzerdung (links) und Fehlerstrom-Schutzschaltung (rechts); Quelle [5], angepasst

Im TT-System sind folgende Schutzmaßnahmen anerkannt [6]:

- Überstrom-Schutzeinrichtung (Schutzerdung)
- Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD)

In neuen Anlagen ist die Schutzmaßnahme Schutzerdung im Allgemeinen oft nicht mehr anwendbar. Bei Erweiterung oder Änderung von älteren Anlagen muss die Ausschaltbedingung (3.1) eingehalten werden [5, Abschnitt 9].

$$Z_S \cdot I_A \leq U_N \quad (3.1)$$

$I_A$  Ausschaltstrom der vorgelagerten Überstrom-Schutzeinrichtung

$U_N$  Nennspannung gegen Erde

$Z_S$  Schleifenimpedanz im Fehlerfall (Erdfehler), ermittelt durch Rechnung oder Messung

Wobei der Ausschaltstrom  $I_A$  mit Hilfe der Beziehung (3.2) berechnet wird.

$$I_A = m \cdot I_N \quad (3.2)$$

$I_N$  Nennstrom der jeweils vorgelagerten Überstrom-Schutzeinrichtung

$m$  Ausschaltstromfaktor

Der Ausschaltstromfaktor ist abhängig von der Art der Überstrom-Schutzeinrichtung und ist in der Tab. 3.2 angegeben.

<b>Art der Überstrom-Schutzeinrichtung</b>	<b>Ausschaltstromfaktor (Endstromkreise mit Nennstrom <math>\leq 32</math> A)</b>	<b>Ausschaltstromfaktor (Verteilungsleitungen und Endstromkreise <math>&gt; 32</math> A)</b>
Schmelzsicherung bis 125 A Typ gG	10	3,5
Leistungsschutzschalter Typ B	5	3,5
Leistungsschutzschalter Typ C	10	3,5
Leistungsschutzschalter Typ D	20	3,5

Tabelle 3.2: Ausschaltstromfaktor von Überstrom-Schutzeinrichtungen; Quelle: [5]

Bei Anwendung der Schutzmaßnahme Fehlerstrom-Schutzschaltung gilt für die Schleifenimpedanz im Fehlerfall die Bedingung (3.3) [5, Abschnitt 12.2].

$$Z_S \leq \frac{U'}{5 \cdot I_{\Delta N}} \leq 100 \Omega \quad (3.3)$$

$I_{\Delta N}$  Nennwert des Auslösefehlerstromes (Nennfehlerstrom) der Fehlerstrom-Schutzeinrichtung

$U'$  Nennspannung zwischen Außenleiter und Neutralleiter

### 3.4 Schutzmaßnahmen im TN-System

Im TN-System ist ein Punkt (ein Systemleiter) über einen Betriebserder niederohmig geerdet. Die Körper der elektrischen Verbraucheranlagen sind über einen Schutzleiter mit dem Betriebserder verbunden. Je nach Anordnung dieses Schutzleiters wird zwischen drei Arten von TN-Systemen (siehe Abb. 3.3) unterschieden [5, Abschnitt 3.1.2].

Im TN-System sind folgende Schutzmaßnahmen anerkannt [6]:

- Überstrom-Schutzeinrichtung (Nullung)
- Fehlerstrom-Schutzeinrichtung

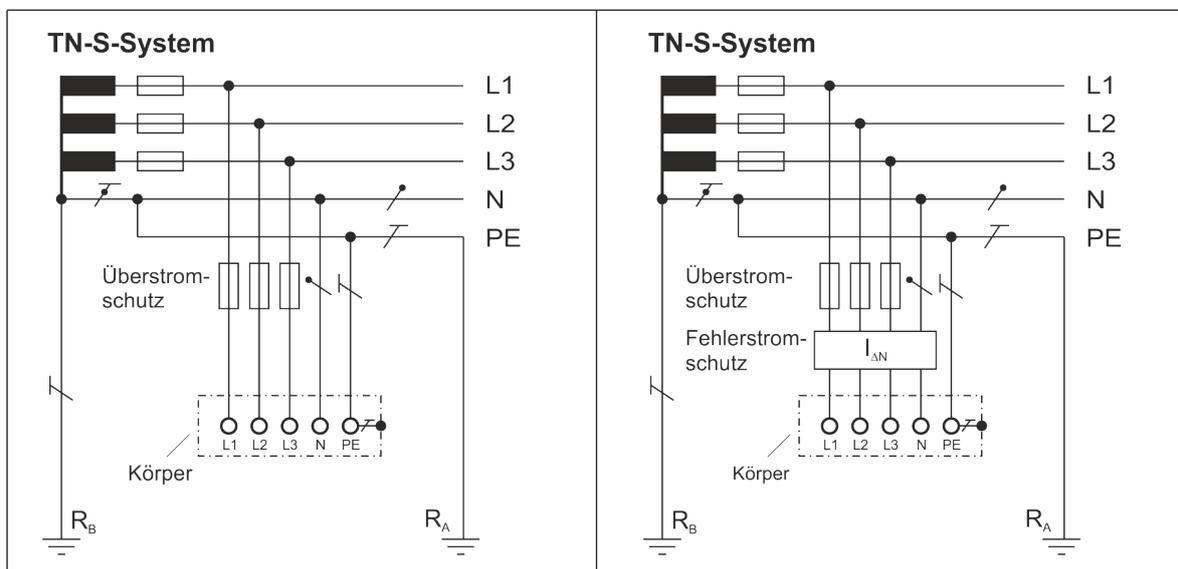


Abbildung 3.6: TN-S-System mit Nullung (links) und mit Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (rechts); Quelle [5], angepasst

Bei TN-Systemen mit einer Nennwechselspannung bis 230 V wird üblicherweise die Schutzmaßnahme Nullung angewendet, d.h. alle zu schützenden Anlagenteile sind entweder direkt oder über einen Schutzleiter an den PEN-Leiter angeschlossen. Im Falle eines Fehlers müssen die fehlerbehafteten Anlagenteile ausgeschaltet werden, vorzugsweise durch Überstrom-Schutzeinrichtungen.

Dabei muss je nach Anwendungsfall eine der folgenden Nullungsbedingungen eingehalten werden [5, Abschnitt 10.2].

### 3.4.1 Ausschaltbedingung in Verteilungsnetzen

Die Leiter sowie die zugehörigen Überstrom-Schutzeinrichtungen müssen so ausgelegt sein, dass im Normalbetrieb des Netzes die Bedingung (3.4) oder (3.5) erfüllt ist.

Für Verteilungsnetze mit Nennspannungen bis 400/230 V gilt [5]:

$$Z_S \cdot 1,6 \cdot I_N \leq U_N \quad (3.4)$$

Für Verteilungsnetze mit höheren Nennspannungen gilt [5]:

$$Z_S \cdot 2,5 \cdot I_N \leq U_N \quad (3.5)$$

### 3.4.2 Ausschaltbedingung für Verteilungsleitungen in Verbraucheranlagen und für Endstromkreise mit Überstrom-Schutzeinrichtungen mit einem Nennstrom über 32 A

*„Für Verteilungsleitungen und für Endstromkreise mit einem Nennstrom über 32 A gilt eine zulässige Ausschaltzeit von 5 s.“ [5]*

### 3.4.3 Ausschaltbedingung für Endstromkreise mit einem Nennstrom bis einschließlich 32 A

*„Für diese Stromkreise gilt eine zulässige Ausschaltzeit von 0,4 s für Nennspannungen bis 230 V gegen Erde sowie von 0,2 s für Nennspannungen bis 400 V gegen Erde.“ [5]*

### 3.4.4 Ausschaltstromfaktor

Alternativ zu den Ausschaltbedingungen in 3.4.2 und 3.4.3 kann die Bedingung (3.6) zur Anwendung kommen,

$$Z_S \cdot I_A \leq U_N \quad (3.6)$$

wobei der Ausschaltstrom nach der Formel (3.7) berechnet wird und der Ausschaltstromfaktor  $m$  aus der Tab. 3.2 zu entnehmen ist.

$$I_A = m \cdot I_N \quad (3.7)$$

### 3.4.5 Ausschaltung mittels Fehlerstrom-Schutzeinrichtung

Kann in einer Verbraucheranlage die Ausschaltbedingung in 3.4.2 bzw. 3.4.3 und der Ausschaltstromfaktor gemäß 3.4.4 z.B. durch eine zu hohe Schleifenimpedanz  $Z_S$  nicht eingehalten werden, ist es notwendig, zusätzlich eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung für den Fehlerschutz zu verwenden. Dabei muss für den betroffenen Stromkreis, abweichend von Tab. 3.2, mindestens ein Ausschaltstromfaktor von  $m = 2,5$  - bezogen auf die jeweils vorgelagerte Überstrom-Schutzeinrichtung - wirksam sein.

### 3.4.6 Maßnahmen bei Nichteinhaltung der Ausschaltbedingungen

Kann bei Verwendung der Schutzmaßnahme Nullung weder die Ausschaltbedingung gemäß 3.4.2 bzw. 3.4.3 oder der Ausschaltstromfaktor nach 3.4.4 oder 3.4.5 eingehalten werden, so muss ein zusätzlicher Potenzialausgleich hergestellt werden.

Dabei muss jedoch noch zumindest ein Ausschaltstromfaktor von  $m = 1,6$  bezogen auf die jeweils vorgelagerte Überstrom-Schutzeinrichtung eingehalten werden.

Zusätzlich zu den bereits angeführten Bedingungen gibt es noch die Erdungsbedingungen (siehe [5, Abschnitt 10.2.2]) und ergänzende Anforderungen bei Nennspannung über 250 V gegen Erde (siehe [5, Abschnitt 10.3]).

### 3.5 Schutzmaßnahmen im IT-System

Im IT-System sind alle aktiven Teile von Erde getrennt oder ein Punkt ist über eine hochohmige Impedanz geerdet. Die Körper der elektrischen Anlage sind über einen Schutzerder geerdet.

Bei dieser Netzform wird die Schutzmaßnahme Isolationsüberwachung eingesetzt (siehe Abb. 3.7). Dabei überwacht das Isolationsüberwachungssystem (IÜW) ständig den Isolationswiderstand des Netzes. Unterschreitet dieser einen voreingestellten Wert, muss dies optisch oder akustisch gemeldet werden. In diesem Fall ist der Fehler so rasch wie möglich zu suchen und zu beseitigen [5].

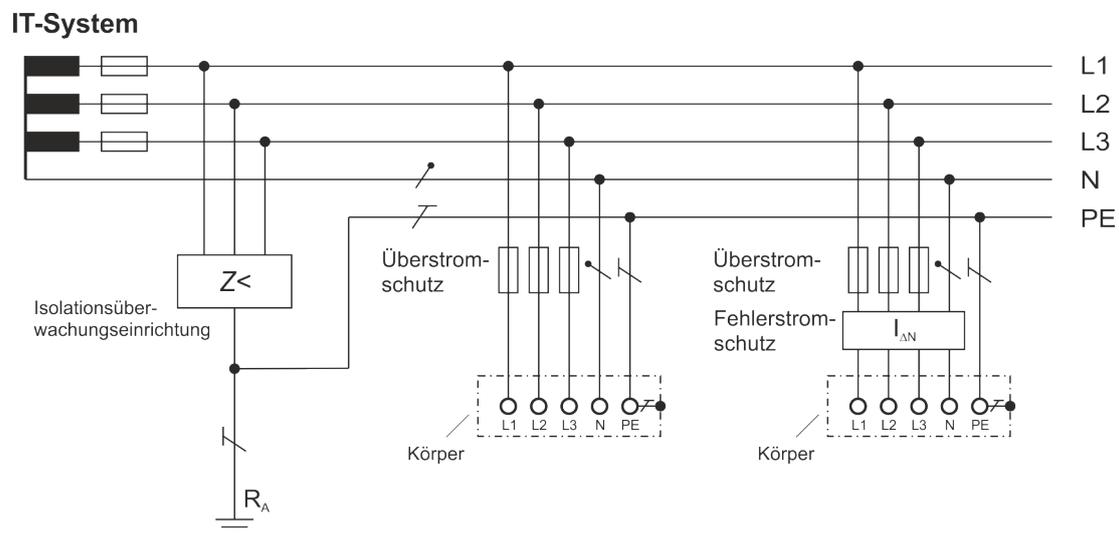


Abbildung 3.7: Prinzipdarstellung für Schutzmaßnahmen im IT-System

Laut der deutschen Norm sind in IT-Systemen folgende Schutz- und Überwachungseinrichtungen anerkannt [6]:

- Isolationsüberwachungseinrichtung ( $Z <$ )
- Differenzstromüberwachungseinrichtung (RCM)
- Isolationsfehlersucheinrichtungen
- Überstrom-Schutzeinrichtung
- Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCDs)

Für ein isoliertes Netz besagt die österreichische Norm **ÖVE/ÖNORM E 8001-1**, Abschnitt 11, dass bei einem ersten Körper- oder Erdschluss nicht ausgeschaltet werden muss, da die Fehlerströme wegen der kleinen Netze nur gering sind. Bei einem zweiten Fehler muss entweder eine automatische Ausschaltung erfolgen, um das Bestehen bleiben einer unzulässigen Fehlerspannung zu verhindern, oder es sind Ersatzmaßnahmen zu treffen [5].

Die deutsche Norm **DIN VDE 0100-410** (VDE 0100-410), Abschnitt 411.6 definiert konkrete Bedingungen, wann ein IT-System im ersten Fehlerfall weiterbetrieben werden darf und was im Falle eines zweiten Fehlers zu beachten ist. Diese Forderungen werden nun näher betrachtet.

### 3.5.1 Abschaltbedingungen im ersten Fehlerfall nach DIN VDE 0100-410

Ein IT-Netz darf bei Auftreten eines Einzelfehlers (gegen einen Körper oder gegen Erde) weiterbetrieben werden, sofern je nach System die Bedingung (3.8) oder (3.9) eingehalten wird [6].

- In Wechselstromsystemen:

$$R_A \cdot I_d \leq 50 \text{ V} \quad (3.8)$$

- In Gleichstromsystemen:

$$R_A \cdot I_d \leq 120 \text{ V} \quad (3.9)$$

$I_d$  Fehlerstrom im Falle des ersten Fehlers mit vernachlässigbarer Impedanz zwischen einem Außenleiter und einem Körper. Der Wert  $I_d$  berücksichtigt die Ableitströme und die Gesamtimpedanz der elektrischen Anlage gegen Erde

$R_A$  Summe der Widerstände des Erders und des Schutzleiters der Körper

Es gibt aber auch ausgedehnte Wechselspannungs- bzw. Drehstromnetze, bei denen ein erhöhter Fehlerstrom auftreten kann (z.B. in der chemischen Industrie oder auf Schiffen). Dort kann als zusätzliche Schutzmaßnahme, eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung verwendet werden. Bei Auftreten eines Folgefehlers/Doppelerdschlusses, gelten je nach Art der Erdung der Körper die Abschaltbedingungen nach dem TN-System (siehe Kap. 3.5.2.1) oder TT-System (siehe Kap. 3.5.2.2).

## 3.5.2 Abschaltbedingungen im zweiten Fehlerfall nach DIN VDE 0100-410

Tritt nach dem ersten Fehlerfall (Erdschluss/Isolationsfehler) auch noch ein zweiter Fehler auf, auf einem anderen Außenleiter als der erste, so müssen die nachfolgenden Bedingungen für die Abschaltung der Stromversorgung gewährleistet sein. Es wird dabei nach der Erdung der Körper der Betriebsmittel unterschieden, welche Forderungen einzuhalten sind. Sind die Körper der Betriebsmittel gemeinsam geerdet so gelten die Bedingungen vergleichbar zum TN-System (siehe Kap. 3.5.2.1), sind die Körper aber einzeln oder in Gruppen geerdet so gelten die Bedingungen vergleichbar zum TT-System (siehe Kap. 3.5.2.2).

### 3.5.2.1 Gemeinsame Erdung der Körper der Betriebsmittel

Sind die Körper der einzelnen Betriebsmittel untereinander über einen Schutzleiter verbunden und gemeinsam geerdet, gilt die Bedingung 3.10 oder 3.11 vergleichbar zum TN-System [6].

In AC und DC-Systemen ohne Neutralleiter muss die Bedingung (3.10) eingehalten werden.

$$Z_S \leq \frac{U}{2 \cdot I_a} \quad (3.10)$$

In Systemen, in welchen der Neutralleiter mitverteilt ist, muss die Bedingung (3.11) eingehalten werden.

$$Z'_S \leq \frac{U'}{2 \cdot I_a} \quad (3.11)$$

Anmerkung: „Der Faktor 2 in beiden Formeln berücksichtigt, dass beim gleichzeitigen Auftreten von zwei Fehlern die Fehler in verschiedenen Stromkreisen bestehen können.“ [6]

$I_a$	Strom, der die Funktion der Schutzeinrichtung innerhalb der in der Tab. 3.3 angegebenen Zeit für TN-Systeme bewirkt
$U$	Nennwechselspannung oder Nengleichspannung zwischen Außenleitern
$U'$	Nennwechselspannung oder Nengleichspannung zwischen Außenleiter und Neutralleiter
$Z_S$	Impedanz der Fehlerschleife, bestehend aus Außenleiter und dem Schutzleiter des Stromkreises
$Z'_S$	Impedanz der Fehlerschleife, bestehend aus Neutralleiter und dem Schutzleiter des Stromkreises

In der Tab. 3.3 sind die maximalen Abschaltzeiten für Endstromkreise mit einem Nennstrom nicht größer als 32 A angegeben.

	TN		TT	
	AC	DC	AC	DC
<b>50 V &lt;math&gt;U_0 \leq 120 V&lt;/math&gt;</b>	0,8 s	1)	0,3 s	1)
<b>120 V &lt;math&gt;U_0 \leq 230 V&lt;/math&gt;</b>	0,4 s	5 s	0,2 s	0,4 s
<b>230 V &lt;math&gt;U_0 \leq 400 V&lt;/math&gt;</b>	0,2 s	0,4 s	0,07 s	0,2 s
<b><math&gt;u_0 &gt;="" 400="" b="" math&gt;<="" v&lt;=""></math&gt;u_0></b>	0,1 s	0,1 s	0,04 s	0,1 s

Tabelle 3.3: Maximale Abschaltzeiten für Endstromkreise mit einem Nennstrom nicht größer als 32 A; Quelle: [6]

1) Es kann eine Abschaltung aus anderen Gründen, wie dem Schutz gegen elektrischen Schlag verlangt sein

$U_0$  Nennwechselspannung oder Nenngleichspannung Außenleiter gegen Erde

### 3.5.2.2 Einzelne oder gruppenweise Erdung der Körper der Betriebsmittel

Sind die Körper der einzelnen Betriebsmittel in Gruppen oder einzeln geerdet, gelten die Bedingungen vergleichbar zum TT-System. Dort muss bei AC-Systemen die Bedingung (3.12) mit den in der Tab. 3.3 angegebenen Zeiten für TT-Systeme eingehalten werden [6].

$$R_A \leq \frac{50 V}{I_a} \tag{3.12}$$

Im Gegensatz zur Tab. 3.3 erhält man in der österreichischen Norm „ÖVE/ÖNORM E 8001-1“ nur Informationen für zulässige Ausschaltzeiten in einem TN-System. In der Tab. 3.4 sind die von der „ÖVE/ÖNORM E 8001-1“ geforderten Ausschaltzeiten in einem TN-System bei Anwendung der Fehlerschutzmaßnahme Nullung angegeben.

	zulässige Ausschaltzeit
<b>Verteilungsleitungen und Endstromkreise über 32 A Nennstrom</b>	5 s
<b>Endstromkreise bis 32 A Nennstrom</b>	
bis 230 V Nennspannung gegen Erde	0,4 s
bis 400 V Nennspannung gegen Erde	0,2 s

Tabelle 3.4: Zulässige Ausschaltzeiten in einem TN-System bei Anwendung der Fehlerschutzmaßnahme Nullung; Quelle: [5]

## 3.6 Das IT-System

Das besondere Merkmal von ungeerdeten/isolierten Wechsel- oder Gleichspannungsnetzen ist, dass kein aktiver Leiter oder Sternpunkt direkt geerdet ist. Damit wird auch bei einem Erd- oder Körperschluss die Funktion des Betriebsmittels nicht beeinflusst. Wie später in Kapitel 3.7 erklärt wird, nimmt der Leiter mit Körper- oder Erdschluss Schutzleiterpotential an und die beiden gesunden Leiter (bei Drehstromnetzen) werden auf die verkettete Spannung angehoben. Der Fehlerstrom, der dabei fließt, ist die Summe der kapazitiven Ableitströme der fehlerfreien Außenleiter. Der Fehlerstrom ist im ersten Fehlerfall meist gering und damit ist keine Ausschaltung erforderlich. Dadurch zeichnen sich diese Netze mit einer besonders hohen Verfügbarkeit aus.

Erst bei einem zweiten Erdschluss, in einem anderen Leiter (Doppelerdschluss oder Kurzschluss), wird der Fehlerstrom so hoch, dass die vorgeschaltete Schutzeinrichtung anspricht. Um dies zu vermeiden und bereits beim ersten Isolationsfehler reagieren zu können, wird die Überwachung des Isolationszustandes gefordert. Zur Überwachung des Isolationszustandes von IT-Netzen werden IÜW verwendet, die den Isolationswiderstand des Netzes ständig messen und das Unterschreiten eines vorgegebenen Isolationswertes akustisch oder optisch melden. Somit kann ein fehlerhafter Anlagenteil in Ruhe gesucht und repariert werden.

Um den großen Vorteil der hohen Betriebs- und Versorgungssicherheit zu wahren, müssen aufgetretene Isolationsfehler oder Erdschlüsse so rasch wie möglich beseitigt werden.

### 3.6.1 Vorteile von IT-Systemen

Die allgemeinen Vorteile von IT-Systemen gegenüber elektrischen Versorgungssystemen mit starr geerdetem Sternpunkt sind [7]:

- die höhere Versorgungssicherheit
- die höhere Brandsicherheit
- die höhere Unfallsicherheit durch niedrigere Berührungsströme bei einpoligem Erdschluss
- der höhere zulässige Erdungswiderstand
- der Informationsvorsprung durch die Isolationsüberwachung (siehe Kap. 3.6.1.5)

Nicht immer treffen alle Vorteile für das jeweilige IT-System zu, aber trotzdem bleiben für viele Einsatzbereiche wesentliche Gründe, die für ein ungeerdetes/isoliertes System sprechen. Wie in Kapitel 3.7 noch erklärt wird, liegt der Nachteil bei der schwierigen Fehlersuche, da in diesen Systemen meist nur sehr geringe Fehlerströme fließen.

### 3.6.1.1 Höhere Versorgungssicherheit

Folgende Punkte beschreiben die Vorteile von IT-Systemen hinsichtlich der Versorgungssicherheit [7]:

- Durch die Möglichkeit der Isolationsüberwachung kann eine höhere Zuverlässigkeit des Netzes erreicht werden („Vor-Warn-Funktion“).
- Ein Erdschluss an einem Leiter stört den Betrieb nicht.
- Durch die ständige Überwachung des Isolationszustandes der Anlage ist eine vorbeugende Instandhaltung möglich (Monitoring schleichender Isolationsfehler).
- Sofortige Meldung eines Isolationsfehlers beim Zuschalten von fehlerbehafteten Geräten.
- Mit geeigneten IÜW (z.B. IRDH575 der Firma Bender) können auch abgeschaltete Netze überwacht werden.
- Fehlverhalten von Steuerungen bei Erdschlüssen wird verhindert (besonders bei Hilfsstromkreisen).

Informationen und Beispiele zum richtigen Aufbau von Hilfsstromkreisen findet man in [7].

### 3.6.1.2 Höhere Brandsicherheit

Nachfolgende Punkte stehen für eine höhere Brandsicherheit in IT-Systemen [7]:

- Durch die Isolationsüberwachung werden langsam eintretende Isolationsschäden schon im Entstehen erkannt und können somit beseitigt werden.
- Sind IT-Netze klein, können Fehlerlichtbögen als Brandursache ausgeschlossen werden (Ausnahme sind besonders ausgedehnte Netze).
- Durch Trenntransformatoren können besonders brand- oder explosionsgefährdete Anlagenteile vom übrigen Netz abgetrennt und als isolierte Netze betrieben werden.

- Teure Geräte wie z.B. Motoren,... können bei unvollkommenem Körperschluss durch Lichtbögen nicht beschädigt werden.

### 3.6.1.3 Höhere Unfallsicherheit

Einen besonderen Vorteil bieten IT-Systeme hinsichtlich der Sicherheit von Menschen bei Berührung von aktiven Leitern. Durch das ungeerdete System lassen sich in kleinen und mittelgroßen Anlagen die Erdschlussströme und somit die Berührungsströme so gering halten, dass auch bei direkter Berührung von einem Leiter und Erde keine Gefährdung für den Menschen besteht.

Wie schon in Kapitel 3.7.1 erwähnt, hängt die Höhe des Fehlerstroms von der Höhe der Netzableitkapazitäten und des Fehlerwiderstandes ab. Dabei liegen die maximalen Ströme, die eventuell durch den Körper fließen können, meist unterhalb der Gefährdungsgrenze. Es ist aber zu beachten, dass es natürlich auch ungeerdete Systeme wie z.B. große Industrienetze gibt, in denen der Fehlerstrom auch für den Menschen gefährliche Werte annehmen kann.

### 3.6.1.4 Höherer zulässiger Erdungswiderstand

Da in IT-Systemen der Fehlerstrom meist sehr gering ist, kann der Erdungswiderstand höhere Werte annehmen, als das in einem TN-System zulässig wäre. Dieser Vorteil wird besonders bei der Verwendung von mobilen Generatoren genutzt, welche z.B. bei Rotem Kreuz, Feuerwehr, etc. zum Einsatz kommen. Dadurch kann auch im Notfall bei unbekanntem Erdungsbedingungen ein ausreichender Schutz gewährleistet werden. Wie schon in Kapitel 3.5 erwähnt, müssen in einem IT-System die Körper entweder einzeln, gruppenweise oder alle miteinander mit dem Schutzleiter verbunden werden. Dabei muss die Bedingung (3.8) oder (3.9) erfüllt werden.

Nach [7] genügt ein  $R_A \leq 100 \Omega$ , bei Einsatz eines mobilen Generators als Ersatzstromversorgungsanlage, wenn dieses Netz als IT-System betrieben wird.

### 3.6.1.5 Informationsvorsprung durch Isolationsüberwachung

Alle vorher genannten Vorteile eines IT-Systems ergeben sich nur, wenn ein IÜW eingesetzt wird, das auf die jeweiligen Anforderungen des zu schützenden Netzes angepasst ist. Werden hier bei der Planung Fehler gemacht, können oft nicht mehr alle Vorteile eines solchen ungeerdeten Systems und damit auch die hohe Versorgungssicherheit erreicht werden.

Aus den Fehlerstatistiken von großen Industriebetrieben und der Elektrizitätsversorgungsunternehmen ist zu erkennen, dass Isolationsfehler und Erdschlüsse eine der Hauptursachen von Betriebsunterbrechungen sind. Dabei entwickeln sich die meisten Fehler sehr langsam und nur relativ wenige treten schlagartig auf. Die Ursachen für eine Verschlechterung des Isolationszustandes sind dabei alltägliche Dinge wie z.B. Feuchtigkeit, Alterung, Verschmutzung, und klimatische Einflüsse. Aber auch Bauarbeiten und andere unvorhergesehene Dinge können die Isolation von Kabeln oder Leitungen beschädigen.

Um dies zu verhindern, muss für die jeweilige Anlage ein passendes IÜW installiert werden. Dadurch ergibt sich eine kontinuierliche Überwachung des Isolationswiderstandes und damit ist auch eine rechtzeitige Warnung vor dem Absinken des Isolationswertes in kritische Bereiche gewährleistet. Mit diesem Plus an Informationen können die Betreiber von IT-Netzen rechtzeitig Instandhaltungsmaßnahmen setzen und somit die Vorteile und die hohe Verfügbarkeit eines ungeerdeten Systems wahren.

## 3.7 Gegenüberstellung von IT- und TT/TN-Netzen

In diesem Kapitel wird auf die Gegensätze, die sich im Fehlerfall in einem Netz mit starrer Erdung zu einem Netz mit isoliertem Sternpunkt ergeben, eingegangen. Dabei wird zuerst erklärt warum bei einem Erdschluss im IT-Netz nur ein geringer kapazitiver Fehlerstrom fließt. Danach wird auf die Spannungsverlagerungen, die sich bei verschiedenen Fehlerarten ergeben, eingegangen und diese in isolierten Netzen mit jener in Netzen mit starrer Erdung verglichen.

### 3.7.1 Der Fehlerstrom im Erdschlussfall

In geerdeten Netzen können im Falle eines Körper- oder Erdschlusses hohe Fehlerströme zwischen der Fehlerstelle und der Stromquelle fließen. In IT-Netzen fließt hingegen nur ein geringer Fehlerstrom, da bei einem Erdschluss kein Rückfluss über den PE-Leiter zur Stromquelle gegeben ist. Die Höhe des auftretenden Fehlerstroms hängt dabei von der Größe des Isolationswiderstandes  $R_F$  und der Kapazität  $C_E$  der Leiter gegen Erde ab. Die Abb. 3.8 und 3.9 zeigen den Unterschied zwischen einem geerdeten und einem isolierten Netz im Fehlerfall.

Bei geerdeten Netzen fließt bei einem Isolationsfehler der Erdschlussstrom  $I_d$ , der dem Kurzschlussstrom  $I_k$  entspricht. Dadurch spricht die vorgeschaltete Sicherung an und es kommt zur Ausschaltung, des fehlerbehafteten Leiters und damit zu einer Betriebsunterbrechung

(siehe Abb. 3.8).

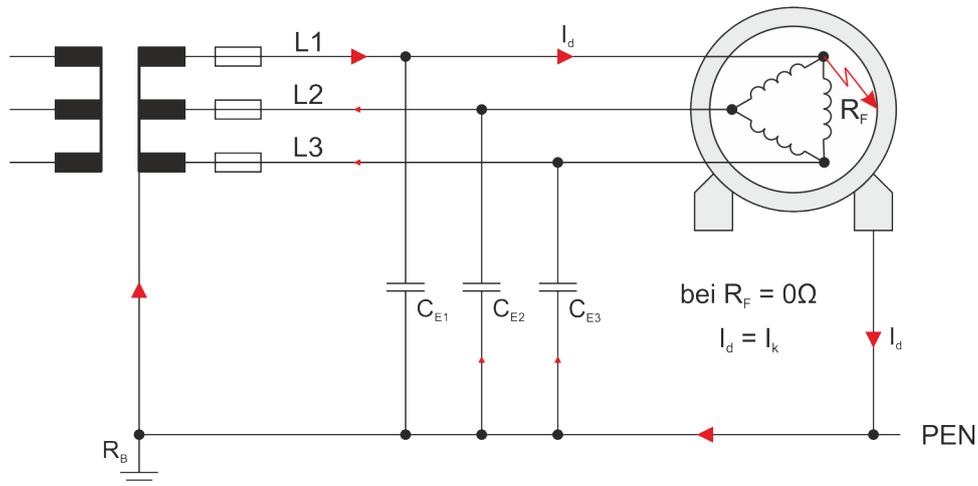


Abbildung 3.8: Isolationsfehler im TN-System; Quelle: [7], angepasst

Im ungeerdeten Netz hingegen fließt im Falle eines Isolationsfehlers nur der meist geringe kapazitive Strom  $I_{CE}$  über die Leitungskapazitäten. Damit spricht die vorgeschaltete Schutz-einrichtung nicht an und die Spannungsversorgung bei einem einpoligen Erdschluss bleibt aufrecht (siehe Abb. 3.9).

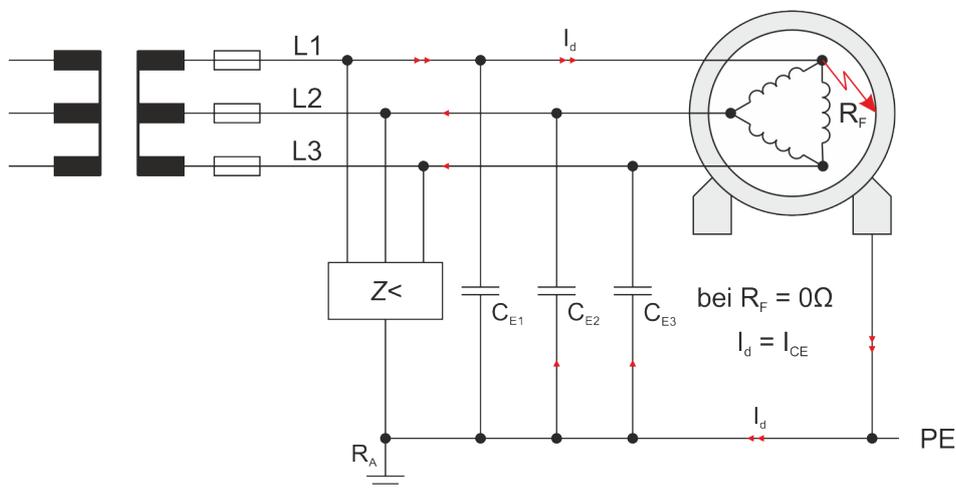


Abbildung 3.9: Isolationsfehler im IT-System; Quelle: [7], angepasst

### 3.7.2 Spannungsverlagerung im Fehlerfall

In diesem Kapitel wird auf die Spannungsverlagerung, die sich bei einem Fehler in einem Netz mit starrer Erdung und einem isoliert betriebenen Netz ergeben, eingegangen. Je nachdem, ob ein Netz isoliert betrieben wird oder eine starre Erdung aufweist, kommt es im Fehlerfall zu einer unterschiedlichen Spannungsverlagerung bzw. Beanspruchung der gesunden Phasen. Zur Erklärung werden dazu die Spannungsverlagerungen, wie sie bei den einzelnen Fehlerarten auftreten an die in der Abb. 3.10 ersichtlichen Mess- und Fehlerstelle dargestellt.

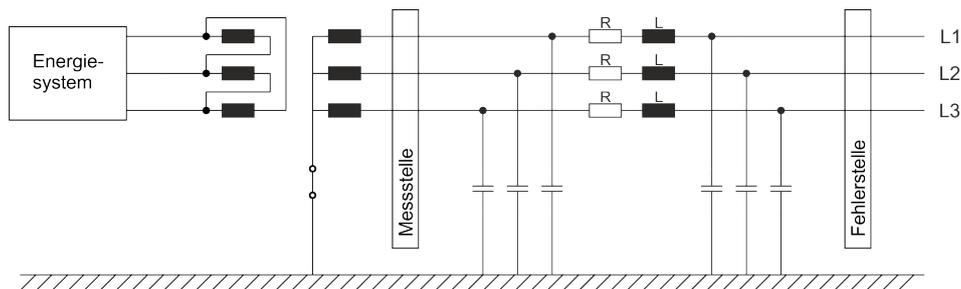


Abbildung 3.10: Darstellung der Messstelle und Fehlerstelle im Netz; Quelle: [14]

Grundsätzlich brechen die Fehlerspannungen an der Fehlerstelle weitgehend zusammen. Mit zunehmender Entfernung von der Fehlerstelle werden diese größer, bis sie am Generator wieder ihre Nennspannung erreichen (ist oberhalb der Abbildungen für die Spannungsverlagerung ersichtlich). In den Abbildungen sind die Phasenspannungen (zwischen Außenleiter und Erde) in blau und die verketteten Spannungen (zwischen den Außenleitern) in schwarz dargestellt.

#### 3.7.2.1 Einphasiger Erdschluss bei einem 1ph-AC/DC-Netz

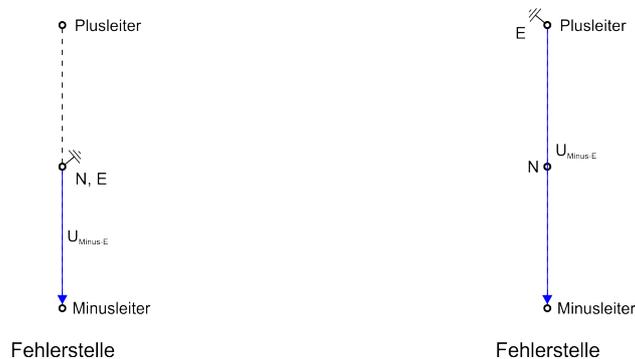


Abbildung 3.11: Spannungsverlagerung bei einem einphasigen Erdschluss (Plusleiter auf PE) in einem DC-Netz (links: mit starrer Erdung; rechts: isoliertes Netz)

Ein einphasiger Erdschluss am Plusleiter wirkt sich in einem DC-Netz wie in Abb. 3.11 dargestellt ist aus. Bei einem Netz mit starrer Erdung bricht die Spannung  $U_{\text{Plus-E}}$  der fehlerbehafteten Phase vollkommen zusammen und nur die Spannung  $U_{\text{Minus-E}}$  des gesunden Leiters bleibt erhalten, siehe Abb. 3.11 links. Im Gegensatz dazu verschiebt sich in einem isolierten Netz der Erdungspunkt zur fehlerbehafteten Phase. Dadurch steigt die Spannung  $U_{\text{Minus-E}}$  der gesunden Phase auf die volle Versorgungsspannung an, siehe Abb. 3.11 rechts.

Bei einem 1ph-AC-Netz kommt es im Grunde zu derselben Spannungsverlagerung wie in einem DC-Netz.



Abbildung 3.12: Spannungsverlagerung bei einem einphasigen Erdschluss (L1 auf PE) in einem 1ph-AC-Netz (links: mit starrer Erdung; rechts: isoliertes Netz)

Das bedeutet: In einem Netz mit starrer Erdung bricht die Spannung  $U_{1E}$  an der Fehlerstelle der fehlerbehafteten Phase vollkommen zusammen und die Phasenspannung  $U_{N-E}$  des gesunden Leiters bleibt erhalten (siehe Abb. 3.12 links). Bei einem Netz mit isolierter Erdung steigt hingegen die Phasenspannung  $U_{N-E}$  an der Fehlerstelle auf die volle Versorgungsspannung an (siehe Abb. 3.12 rechts).

### 3.7.2.2 Einphasiger Erdschluss bei einem 3ph-AC-Netz

Die Spannungsverlagerung bei einem einphasigen Erdschluss in einem Netz mit starrer Erdung, wird mit der in einem isolierten Netz verglichen.

- Netz mit starrer oder niederohmiger Erdung

Durch die starre Erdung des Sternpunkts dieser Netzform bleibt der Neutral- bzw. Erdungspunkt (in den Abbildungen mit N, E bezeichnet) im Spannungsdreieck immer an derselben Stelle. Bei einem einphasigen Erdschluss bricht die Spannung der fehlerbehafteten Phase an der Fehlerstelle vollkommen ein, in Abb. 3.13 rechts dargestellt. Bis zur Messstelle baut sich die Spannung  $U_{1E}$  auf Grund des Stromflusses zur Fehlerstelle wieder etwas auf (siehe Abb. 3.13 links). Die Spannungen  $U_{2E}$  und  $U_{3E}$  an den beiden gesunden Phasen bleiben erhalten.

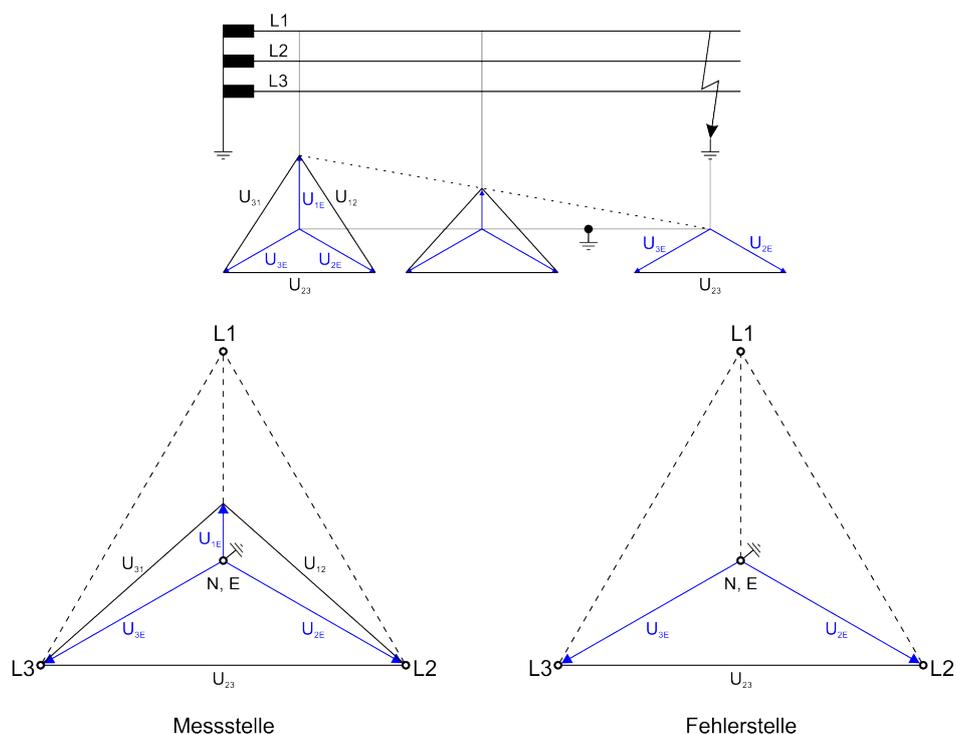


Abbildung 3.13: Spannungsverlagerung bei einem einphasigen Erdschluss L1 auf PE im Netz mit starrer Erdung; Quelle: [14]

- Isoliertes Netz

Da im isolierten Netz keine Erdung des Sternpunktes vorhanden ist, verschiebt sich im Falle eines Erdschlusses der Erdungspunkt im Spannungsdreieck zur gesunden Phase. Deshalb werden an den beiden gesunden Phasen die Spannungen  $U_{2E}$  und  $U_{3E}$  auf das  $\sqrt{3}$ -fache

angehoben (siehe Abb. 3.14). Aus diesem Grund kommt es bei dieser Netzform zu einer großen Beanspruchung der Isolation bei einem Erdschluss.

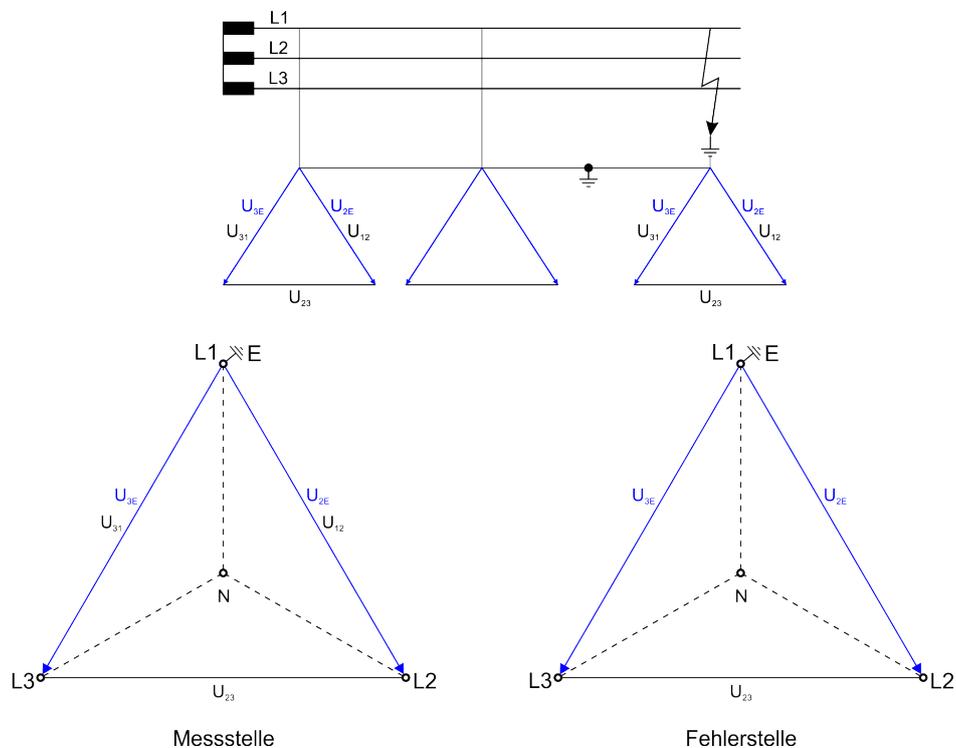


Abbildung 3.14: Spannungsverlagerung bei einem einpoligen Erdschluss L1 auf PE im isolierten Netz; Quelle: [14]

### 3.7.2.3 Phase-Phase Fehler mit Erdberührung bei einem 3ph-AC-Netz

Nachfolgend wird die Spannungsverlagerung bei einem Phase-Phase Fehler mit Erdberührung in einem Netz mit starrer Erdung zu einem isolierten Netz verglichen.

- Netz mit starrer oder niederohmiger Erdung

In diesem Fall brechen an der Fehlerstelle die beiden Phasenspannungen  $U_{2E}$  und  $U_{3E}$  der fehlerbehafteten Phasen auf Null zusammen, in Abb. 3.15 rechts dargestellt. Bis zur Messstelle bauen sich diese wieder etwas auf, nur die Spannung  $U_{1E}$  bleibt erhalten (siehe Abb. 3.15 links).

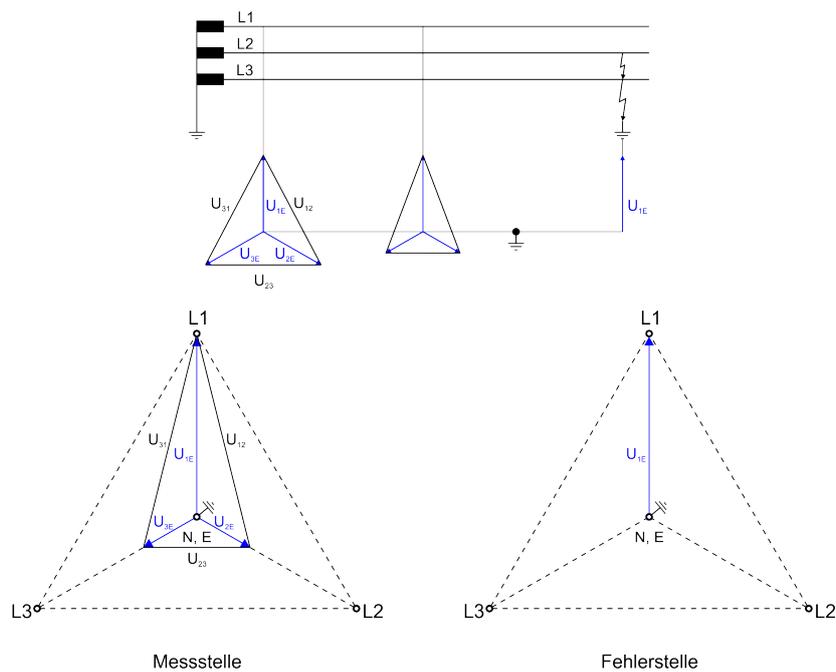


Abbildung 3.15: Spannungsverlagerung bei einem Phase-Phase Fehler mit Erdberührung (L2 und L3 auf PE) im Netz mit starrer Erdung; Quelle: [14]

- Isoliertes Netz

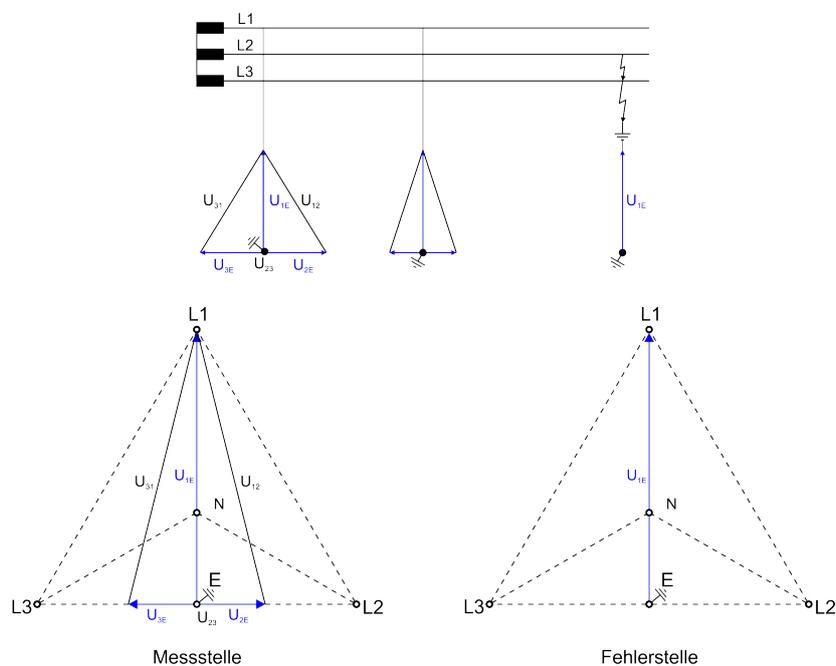


Abbildung 3.16: Spannungsverlagerung bei einem Phase-Phase Fehler mit Erdberührung (L2 und L3 auf PE) im isolierten Netz; Quelle: [14]

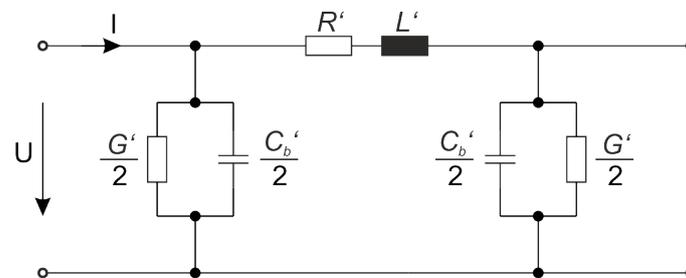
Durch den Phase-Phase Fehler mit Erdberührung auf L2 und L3 verschiebt sich der Erdungspunkt nach unten wie in Abb. 3.16 dargestellt ist. Dadurch steigt die Phasenspannung  $U_{1E}$  an, und die anderen Spannungen brechen an der Fehlerstelle vollkommen ein (siehe Abb. 3.16 rechts).

Somit liegt der wesentliche Vorteil von starr geerdeten Netzen gegenüber isolierten Netzen in der geringeren Isolationsbeanspruchung im Fehlerfall, da nur eine geringe Anhebung der Leiter-Erde-Spannung in den gesunden Außenleitern erfolgt. Außerdem wird der Fehlerort klar durch die entsprechenden selektiven Schutzeinrichtungen erkannt, da im Vergleich zu IT-Netzen ein hoher Fehlerstrom fließt.

Der große Vorteil von isolierten Netzen ist, dass diese im ersten Fehlerfall (Isolationsfehler/Erdschluss) weiterbetrieben werden können, da nur der von der Netzausdehnung abhängige geringe kapazitive Ableitstrom fließt. Der Nachteil gegenüber geerdeten Netzen besteht in der höheren Isolationsbeanspruchung, da im Fehlerfall die Phase-Erde Spannungen in den gesunden Leitern bis auf das  $\sqrt{3}$ -fache angehoben werden kann (siehe Kap. 3.7.2). Ein weiterer Nachteil ist, dass wegen des geringen Fehlerstroms der Fehlerort schwieriger zu lokalisieren ist [14].

## 4 Laboraufbau

In den nachfolgenden Kapiteln wird auf Berechnungen und Simulationen zum IT-Netz eingegangen. Um diese Ergebnisse überprüfen und auch reale Versuche in einem IT-Netz durchführen zu können, wurde ein Laboraufbau angefertigt, der eine (einphasige) Leitung mittels dem  $\pi$ -Modell nachbildet. Dieses  $\pi$ -Ersatzschaltbild beschreibt das elektrische Verhalten einer Leitung mit Erdrückleiter, welches in Abb. 4.1 dargestellt ist.



$R'$  Widerstandsbelag in  $\Omega/\text{km}$

$L'$  Induktivitätsbelag in  $\text{mH}/\text{km}$

$C_b'$  Betriebskapazitätsbelag in  $\mu\text{F}/\text{km}$

$G'$  Ableitungsbelag in  $1/(\text{M}\Omega \cdot \text{km})$

Abbildung 4.1:  $\pi$  - Ersatzschaltbild einer Leitung; Quelle[17], angepasst

Der Widerstandsbelag  $R'$  steht für den ohmschen Widerstand und der Induktivitätsbelag  $L'$  repräsentiert die Induktivität pro Längeneinheit des Leiters. Die Kapazität eines Leiters gegen Erde und gegenüber anderen Leitern wird im Betriebskapazitätsbelag  $C_b'$  zusammengefasst. Der Ableitungsbelag  $G'$  beschreibt die Verluste, die durch eine unvollständige Isolation entstehen. Die einzelnen Größen sind dabei längenbezogen, dies wird mit dem Hochkomma „ ' “ nach dem Elementzeichen symbolisiert. Zu beachten ist, dass dieses Modell mit zunehmender Leitungslänge ungenauer wird. Dies liegt daran, dass die einzelnen diskreten Elemente ( $C'$ ,  $L'$  und  $R'$ ) bei einer Leitung nicht nur am Leitungsanfang und -ende wie im Modell

(siehe Abb. 4.1) zu finden sind, sondern gleichmäßig über die Länge verteilt sind. Deshalb muss bei großen Leitungslängen ein frequenzabhängiger Korrekturfaktor berechnet werden, um Berechnungsfehler zu vermeiden. Die einzelnen Leitungsmodule, die für den Laboraufbau gefertigt wurden, erreichen eine Länge von maximal 5 km. Deswegen spielt dies bei üblichen 230/400 V - Systemen und den Betrachtungen und Messungen in dieser Diplomarbeit keine Rolle.

Mit dem Labormodell werden die kapazitiven Kopplungen zwischen den einzelnen Leitern eines Leitungssystems berücksichtigt. Für diese Diplomarbeit ist besonders die Erdkapazität  $C_E$  von entscheidender Bedeutung, da diese mit dem Fehlerwiderstand  $R_F$  die Größe des Stroms im Falle eines Erdschlusses im IT-Netz bestimmt.

## 4.1 Berechnung von $C'$ , $L'$ und $R'$

Zur Berechnung der Kapazitäts-, Induktivitäts- und Widerstandswerte wurde das Kabel E-YCY (0,6/1 kV) mit 12 Adern und einem Nennquerschnitt von  $2,5 \text{ mm}^2$  der Schwedater Kabelwerke (SKW) herangezogen. Für die Berechnungen wurden verschiedene Abmessungen des Kabels benötigt, welche in der Abb. 4.2 und 4.3 dargestellt sind. Die angegebenen Abmessungen wurden entweder aus dem Datenblatt des Kabels entnommen oder durch Messung und Berechnung ermittelt.

Dieses Kabel wurde auf Grund einer vorhergehenden Untersuchung zur Ermittlung der einzelnen Beläge herangezogen. In üblichen Niederspannungsnetzen kommt dieser Kabeltyp aber nicht zum Einsatz.

Bei den nachfolgenden Berechnungen der einzelnen Beläge wurden einige Vereinfachung gemacht, da es für den Laboraufbau nicht entscheidend war, das vorliegende Kabel exakt nachzubilden. Die Größe der Kapazitätsbeläge hängt unter anderem vom Aufbau und der Anordnung der Leiter im Kabel ab. Somit variieren diese von Kabel zu Kabel, und es reicht eine Näherung der Werte von  $C'$ ,  $L'$  und  $R'$  für den Laboraufbau aus.

### 4.1.1 Der Kapazitätsbelag $C'$

Für die Ermittlung der einzelnen Kapazitätsbeläge wurden die Formeln für ein dreidriges Gürtelkabel (4.1), (4.2) und (4.3) verwendet [17].

$$C'_b = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\sqrt{\frac{3c^2(r_1^2-c^2)^3}{r_L^2(r_1^6-c^6)}}} \quad (4.1)$$

$$C'_0 = C'_E = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_1^6-c^6}{3c^2r_Lr_1^3}\right)} \quad (4.2)$$

$$C'_b = C'_E + 3C'_L \quad (4.3)$$

$c$	Abstand Mittelpunkt des Kabels - Mitte einer Ader
$C'_0$	Nullkapazitätsbelag in $\mu\text{F}/\text{km}$
$C'_E$	Kapazitätsbelag zwischen Leiter und Erde in $\mu\text{F}/\text{km}$
$C'_L$	Kapazitätsbelag zwischen zwei Leitern in $\mu\text{F}/\text{km}$
$r_1$	Abstand Leiter - Schirm
$r_L$	Radius des Leiters
$\epsilon_0$	Permittivität des Vakuums ( $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ )
$\epsilon_r$	relative Permittivität, $\epsilon_r = 8$ bei PVC-Kabel (bei Betriebstemperatur)

Wie schon zuvor erwähnt, wurden bei den Berechnungen gewisse Vereinfachungen getroffen, da eine Näherung genügt, wurden die Kapazitätsbeläge jeweils nur für die Abstände  $c_1$  und  $c_2$  (siehe Abb. 4.2) ermittelt. Aus diesen beiden Teilergebnissen wurde der Mittelwert gebildet und dann für die Fertigung der Labormodule herangezogen.

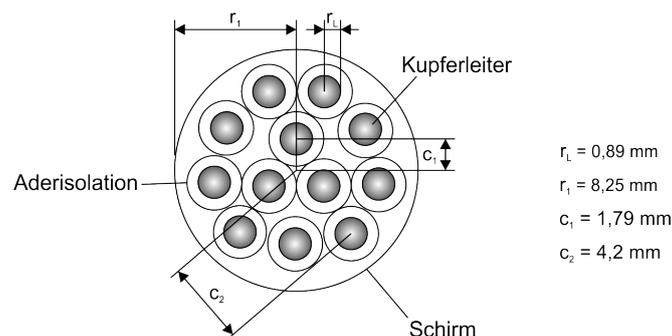


Abbildung 4.2: Prinzipdarstellung des Erdkabels E-ICY (0,6/1kV) mit  $12 \times 2,5\text{mm}^2$

- Betriebskapazitätsbelag  $C'_b$ :

Nach der Formel (4.1) ergibt sich für  $c_1 = 1,79 \text{ mm}$  eine Kapazität von  $C'_{b1} = 0,38 \mu\text{F}/\text{km}$ . Bei einem Abstand von  $c_2 = 4,2 \text{ mm}$  ist  $C'_{b2} = 0,27 \mu\text{F}/\text{km}$ . Damit ergibt sich ein mittlerer

Betriebskapazitätsbelag von:

$$C'_b = \frac{C'_{b1} + C'_{b2}}{2} = 0,32 \mu F/km \quad (4.4)$$

- Erdkapazitätsbelag  $C'_E$ :

Bei Verwendung der Formel (4.2) ergibt sich für den Abstand  $c_1$  eine Kapazität von  $C'_{E1} = 0,11 \mu F/km$  und für  $c_2$  ist  $C'_{E2} = 0,18 \mu F/km$ . Somit ergibt sich ein mittlerer Erdkapazitätsbelag von:

$$C'_E = \frac{C'_{E1} + C'_{E2}}{2} = \underline{0,14 \mu F/km} \quad (4.5)$$

- Koppelkapazitätsbelag  $C'_K = C'_L$ :

Durch Umformen der Formel (4.3) lässt sich ein mittlerer Koppelkapazitätsbelag  $C'_K$  bestimmen zu:

$$C'_K = \frac{C'_b - C'_E}{3} = \underline{0,06 \mu F/km} \quad (4.6)$$

### 4.1.2 Der Induktivitätsbelag $L'$

Zur Berechnung des Induktivitätsbelags  $L'$  je Leiter einer Leiterschleife wurde die Formel (4.7) verwendet [17].

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{a}{\rho}\right) \quad (4.7)$$

$a$  Abstand zwischen den Leitern

$\mu_0$  Permeabilität des freien Raums ( $4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ )

$\rho$  Ersatzradius des Leiters ( $\rho = 0,779 \cdot r_L$ ) [17]

Damit ergibt sich nach der Formel (4.7) für die verschiedenen Abstände  $a_1$ ,  $a_2$  und  $a_3$  aus Abb. 4.3 folgende Werte für  $L'$ :

- $a_1 = 3,1 \text{ mm}$ :  $L'_{a1} = 0,3 \text{ mH/km}$
- $a_2 = 5,75 \text{ mm}$ :  $L'_{a2} = 0,42 \text{ mH/km}$
- $a_3 = 8,4 \text{ mm}$ :  $L'_{a3} = 0,5 \text{ mH/km}$

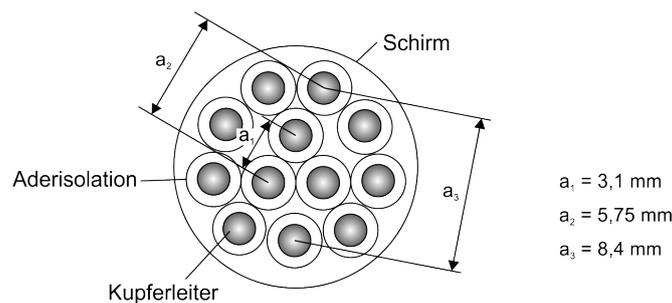


Abbildung 4.3: Prinzipdarstellung des Erdkabels E-YCY (0,6/1kV) 12 x 2,5mm<sup>2</sup>

Der endgültige Induktivitätsbelag  $L'$ , der für die Labormodule als Basis verwendet wurde, ist der Mittelwert (4.8) aus den vorher ermittelten Teilergebnissen.

$$L' = \frac{L'_{a1} + L'_{a2} + L'_{a3}}{3} \approx \underline{0,4 \text{ mH/km}} \quad (4.8)$$

### 4.1.3 Der Widerstandsbelag $R'$

Der Widerstandsbelag  $R'$  wurde dem Datenblatt des Kabels von SKW entnommen. Der maximale Leiterwiderstand beträgt für das Energiekabel E-YCY (0,6/1 kV) mit 12 Adern und einem Nennquerschnitt von 2,5 mm<sup>2</sup> laut Datenblatt:

$$R' = \underline{7,41 \Omega/km}$$

## 4.2 Der Laboraufbau

Für den Laboraufbau wurden Module, die ein 3ph-Netz mit N- und PE-Leiter darstellen, nach dem  $\pi$ -Modell gefertigt. Durch abgestufte Werte für  $C_E'$ ,  $C_K'$ ,  $L'$  und  $R'$  kann mit einem einzelnen Labormodul eine Netzlänge von 20 m, 50 m, 100 m, 1 km oder 5 km nachgebildet werden. Die benötigten Bauteilwerte für die diskreten Elemente C, L und R wurden im Kapitel 4.1 berechnet. Die einzelnen Beläge, die pro km angegeben sind, wurden auf die jeweilige Länge umgerechnet (siehe Tab. 4.1).

An Hand dieser Referenzwerte wurden die jeweiligen Bauteile bestellt, wobei es hierbei zu Abweichungen kam, da die Referenzwerte mit den Bauteilwerten nicht immer übereinstimmten oder die gewünschten Anforderungen nicht erfüllt wurden. Denn die Kapazitäten wurden hinsichtlich der Spannungsfestigkeit ausgewählt, die Induktivitäten und Widerstände nach der Strombelastbarkeit. Die Abweichung der berechneten Referenzwerte zu den tatsächlich im Laboraufbau verwendeten Größen ist in Tab. 4.1 angegeben.

	20 m	50 m	100 m	1 km	5 km
<b>Erdkapazität <math>C_E/2</math></b>					
Referenzwert (Berechnung)	1,4 nF	3,5 nF	7 nF	70 nF	350 nF
Bauteilwert	1,5 nF	3,3 nF	6,8 nF	68 nF	330 nF
<b>Koppelkapazität <math>C_K/2</math></b>					
Referenzwert (Berechnung)	0,6 nF	1,5 nF	3 nF	30 nF	150 nF
Bauteilwert	1 nF	1,5 nF	3,3 nF	33 nF	150 nF
<b>Leitungsinduktivität <math>L</math></b>					
Referenzwert (Berechnung)	0,008 mH	0,02 mH	0,04 mH	0,4 mH	2 mH
Bauteilwert	0,0082 mH	0,022 mH	0,039 mH	0,47 mH	1,72 mH
<b>Leitungswiderstand <math>R</math></b>					
Referenzwert (Berechnung)	0,1482 $\Omega$	0,3705 $\Omega$	0,741 $\Omega$	7,41 $\Omega$	37,05 $\Omega$
Bauteilwert	0,136 $\Omega$	0,4 $\Omega$	0,825 $\Omega$	7,5 $\Omega$	34 $\Omega$

Tabelle 4.1: Vergleich der Referenzwerte zu den tatsächlichen Bauteilwerten

In Abb. 4.4 ist das Schaltbild der Module des Laboraufbaues zu sehen, wie oben schon erwähnt kann ein Modul unterschiedliche Leitungslängen nachbilden (20 m, 100 m, 1 km,...).

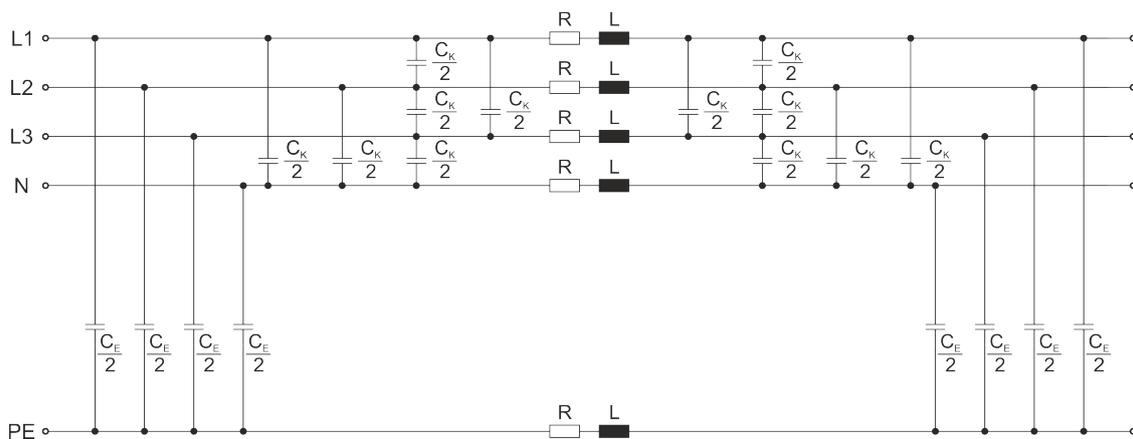


Abbildung 4.4: Schaltbild der Labormodule

Je nach Untersuchungszweck wurden einzelne Module der jeweiligen Länge, zum gewünschten IT-Netz verschaltet und die jeweiligen Messgrößen aufgenommen.

Wenn in anderen Kapiteln der Laboraufbau erwähnt wird, ist immer eine Versuchsanordnung mit diesen Modulen gemeint.

## 5 Berechnung und Simulation

Ein wesentlicher Faktor für die Beurteilung, ob ein IT-Netz bei einem Erdschluss weiterbetrieben werden darf, ist die Größe des kapazitiven Fehlerstroms  $I_{CE}$ . Um eine erste Aussage über die mögliche Netzausdehnung treffen zu können, wurde  $I_{CE}$  nach der Formel (5.1) berechnet.

- Für 3ph-AC-IT-Netze gilt [11]:

$$I_{CE} = I_d = 3U_N \omega C'_E l = \sqrt{3} U \omega C'_E l \quad (5.1)$$

$f$	Frequenz in Hz
$l$	Netzlänge in km
$U_N$	Nennspannung gegen Erde in V
$U$	Nennspannung zwischen den Außenleitern in V
$\pi$	Kreiszahl = 3,14159...
$\omega$	$\omega = 2\pi f$ , Kreisfrequenz in 1/s

Mit dieser einfachen Formel wird der Fehlerstrom bei einem Erdschluss mit  $R_f = 0 \Omega$  in einem 3-phasigen Wechselspannungsnetz ermittelt. Die in Tab. 5.1 angegebenen Werte ergeben sich nach Anwendung der Formel (5.1) bei einem 3ph-AC-Netz mit  $U_N = 230 \text{ V}$  und  $f = 50 \text{ Hz}$ . Dabei wurde der Erdkapazitätsbelag von  $C'_E = 0,14 \mu\text{F}/\text{km}$ , der in Kapitel 4.1.1 ermittelt wurde, als Referenzwert verwendet.

$l \text{ [km]}$	0,02	0,05	0,1	0,5	1	5	10	12	15	20
$I_{CE} \text{ [A]}$	0,0006	0,0015	0,003	0,015	0,030	0,152	0,305	0,366	0,457	0,609

Tabelle 5.1: Kapazitiver Fehlerstrom nach Formel (5.1) bei einem 3ph-AC-IT-Netz mit  $U_N = 230 \text{ V}$

Wie aus der Formel (5.1) bereits zu erkennen ist, kommt es zu einem linearen Anstieg des Fehlerstroms mit der Netzlänge. Würde ein relativ hoher Widerstand für  $R_A$  von  $100 \Omega$  angenommen, wird nach der Formel (3.8) erst bei 16,41 km die erlaubten 50 V laut [6] erreicht.

Das bedeutet, dass ein Netz mit einem  $R_A = 100 \Omega$  beim ersten Fehlerfall bis zu einer Netzausdehnung von 16,48 km weiterbetrieben werden darf. Ist  $R_A$  kleiner als die angenommenen  $100 \Omega$ , können auch wesentlich größere Netze bei einem Erdschluss weiterbetrieben werden, ohne dass gefährlich hohe Berührungsspannungen auftreten (mehr dazu in Kap. 5.4).

Um die berechneten Werte mit realen Werten vergleichen zu können, wurden einerseits ein Simulationsmodell in Matlab erstellt und andererseits die Fehlerströme am Laboraufbau gemessen. Der Laboraufbau, an dem die Messungen durchgeführt wurden, wurde bereits in Kapitel 4 ausführlich beschrieben.

## 5.1 Simulation eines IT-Netzes in Matlab-Simulink

Für die Simulation eines IT-Netzes wurde mithilfe der Simulationssoftware Simulink, einem Zusatzprodukt von Matlab, ein entsprechendes Modell realisiert. Um die Simulationswerte mit den gemessenen Werten am Laboraufbau bestmöglich vergleichen zu können, wurden Netzmodule unterschiedlicher Länge erstellt (20 m, 50 m, 100 m, 1 km und 5 km). Diese Netzmodule in Simulink sind eine exakte Nachbildung der Labormodule (siehe Abb. 4.4), mit denselben diskreten Elementen und Bauteilwerten. Je nach Bedarf wurden diese dann zum gewünschten Netz zusammengeschaltet.

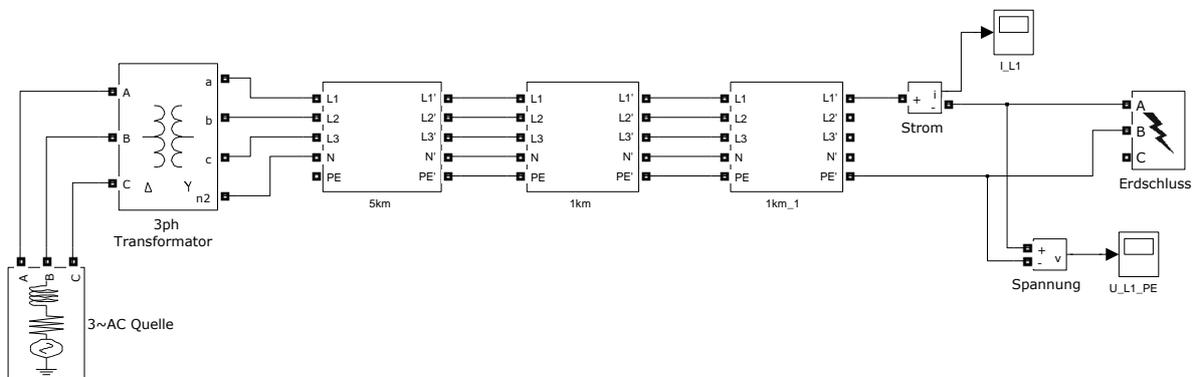


Abbildung 5.1: Matlab-Simulink Modell eines 3ph-AC-IT-Netzes mit N-Leiter

Zur Ermittlung des Fehlerstroms in Abhängigkeit der Netzlänge wurden einzelne Module zu verschiedenen Netzausdehnungen verbunden (siehe Abb. 5.1). Am Netzende wurde ein Erdschluss von L1 nach PE simuliert und der Fehlerstrom auf der Phase L1 ausgegeben. Beim Block „Erdschluss“ (ersichtlich am Netzende der Abb. 5.1) handelt es sich um ein Simulink-Modul, mit dem unterschiedliche Kurzschlüsse wie auch Erdschlüsse simuliert werden können.

Bei dieser Simulation wurde es dazu verwendet, eine Verbindung zwischen L1 und PE zu erzeugen, also einen Erdschluss von L1 auf PE zu simulieren. Die in Matlab berechneten Werte sind in Tab. 5.2 aufgelistet. Dabei wurde die Simulation jeweils einmal für ein 3-Leiter IT-Netz mit L1, L2 und L3 durchgeführt und einmal für ein 4-Leiter IT-Netz mit L1, L2, L3 und N-Leiter. Die maximale simulierte Netzlänge beträgt 20 km.

l [km]	4-Leiter IT-Netz (L1, L2, L3 und N-Leiter)	3-Leiter IT-Netz (L1, L2, und L3)
	$I_{CE}$ [A]	$I_{CE}$ [A]
0,02	0,0009	0,0008
0,05	0,002	0,0017
0,1	0,004	0,0035
0,15	0,006	0,005
0,2	0,008	0,007
1	0,039	0,035
2	0,079	0,071
3	0,118	0,106
5	0,191	0,171
6	0,230	0,206
7	0,269	0,241
9	0,347	0,311
10	0,379	0,340
11	0,416	0,374
12	0,452	0,407
15	0,546	0,494
17	0,600	0,548
20	0,658	0,609

Tabelle 5.2: Kapazitiver Fehlerstrom berechnet mit dem Matlab-Simulink Modell (bei einem 3ph-AC-IT-Netz mit  $U_N = 230$  V)

## 5.2 Kapazitiver Fehlerstrom am Laboraufbau

Der Fehlerstrom wurde am 3-phasigen Laboraufbau mit PE-Leiter gemessen. Als Versorgung diente eine 3-phasige 230-V-Wechselspannungsquelle. Es wurde dabei einmal ein IT-Netz mit 3-Leiter (L1, L2 und L3) und einmal mit 4-Leiter (L1, L2, L3 und N-Leiter) aufgebaut.

Wie beim Simulationsmodell wurden einzelne Labormodule zur gewünschten Netzlänge verbunden. In Abb. 5.2 ist der Messaufbau beispielhaft mit einer Netzlänge von 7 km dargestellt.

Mit den verfügbaren diskreten Bauteilen konnten 3ph-AC-Netze mit N und PE-Leiter mit einer maximalen Länge von bis zu 12 km simuliert werden.

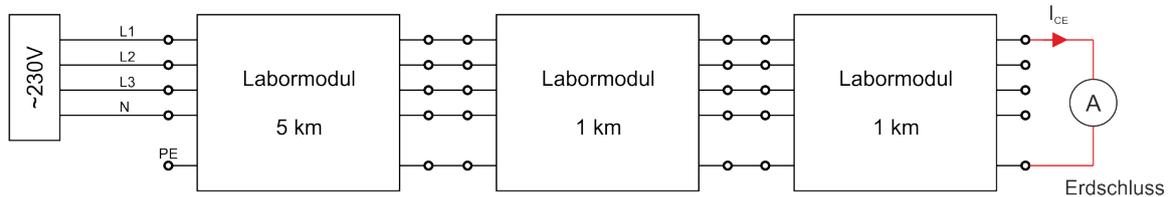


Abbildung 5.2: Messaufbau zur Ermittlung des kapazitiven Fehlerstromes  $I_{CE}$  (hier beispielhaft mit einer Netzlänge von 7 km)

Es wurde jeweils am Netzende ein Erdschluss von L1 nach PE gesteckt und der entsprechende Fehlerstrom mit dem Messgerät Dewe-3020 (Messshunt =  $0,1 \Omega$ ) gemessen. Die gemessenen kapazitiven Fehlerströme am Laboraufbau sind in Tab. 5.3 angegeben.

l [km]	4-Leiter IT-Netz (L1, L2, L3 und N-Leiter)	3-Leiter IT-Netz (L1, L2, und L3)
	$I_{CE}$ [A]	$I_{CE}$ [A]
0,02	0,001	0,001
0,05	0,002	0,002
0,1	0,004	0,004
0,15	0,006	0,006
0,2	0,008	0,008
1	0,038	0,035
2	0,076	0,069
5	0,194	0,173
6	0,234	0,210
7	0,270	0,242
10	0,385	0,346
11	0,421	0,379
12	0,456	0,409

Tabelle 5.3: Kapazitiver Fehlerstrom gemessen am Laboraufbau bei einem 3ph-AC-IT-Netz mit  $U_N = 230 \text{ V}$

### 5.3 Vergleich der ermittelten Fehlerströme

In Abb. 5.3 sind die ermittelten Erdschlussströme in einem IT-Netz mit unterschiedlicher Netzlänge dargestellt. Dabei sind die Ergebnisse aus den einzelnen Ermittlungsverfahren einander gegenübergestellt.

Wie aus der Abb. 5.3 ersichtlich ist, steigt der berechnete Fehlerstrom linear mit der Netzausdehnung an. Bereits an Hand der Formel (5.1) ist zu erkennen, dass die Steigung der Geraden bei konstanter Spannung nur von der Höhe des Erdkapazitätsbelags  $C_E'$  abhängt. Der Unterschied zu den simulierten und gemessenen Werten resultiert aus der vereinfachten Formel (5.1), da diese nur die Länge und die Erdkapazität des Netzes berücksichtigt, Koppelkapazitäten hingegen nicht. In der Realität sind aber auch Kopplungen zwischen den einzelnen Leitern vorhanden, auf welche schon im Kapitel 4 eingegangen wurde. Dadurch ergeben sich im Netz unsymmetrische Spannungsverhältnisse und kapazitive Unsymmetrien, die durch die Beziehung (5.1) nicht berücksichtigt werden.

Weiters ist ersichtlich, dass die Ergebnisse aus der Simulation gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen.

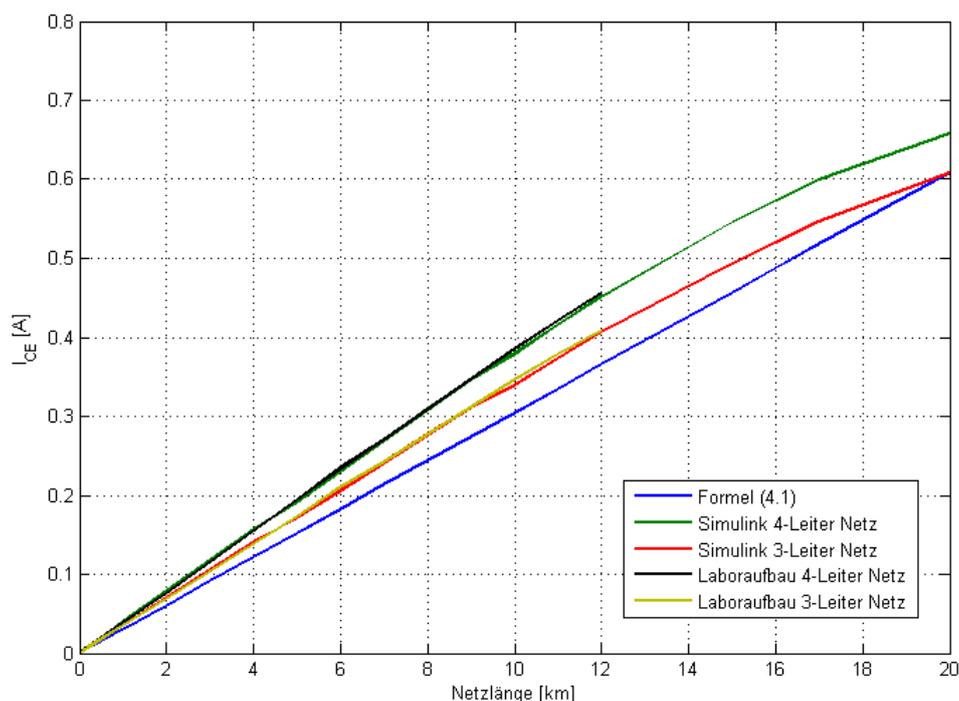


Abbildung 5.3: Vergleich der kapazitiven Fehlerströme bei einem Erdschluss in einem 3ph-AC-IT-Netz mit  $U_N = 230$  V durch Berechnung, mit der Formel (5.1), Simulationen in Matlab-Simulink und Messungen am Laboraufbau

Der Unterschied zwischen einem 3-Leiter IT-Netz und einem 4-Leiter IT-Netz resultiert aus der unterschiedlichen Höhe der Erdkapazität. Durch den zusätzlichen Leiter, dem N-Leiter, ergibt sich eine größere Erdkapazität im 4-Leiter Netz und somit erhöht sich auch der Erd-

schlussstrom. Ein weiteres wichtiges Merkmal ist, dass ab etwa 9 km Netzlänge der Anstieg der simulierten und gemessenen Werte des kapazitiven Fehlerstromes  $I_{CE}$  abnimmt.

## 5.4 Maximale Ausdehnung von IT-Netzen

In den neueren Normenwerken finden sich keine Werte für den Anlagenwiderstand, der in IT-Netzen eingehalten werden sollte, damit ein sicherer Betrieb im Sinne der Personensicherheit auch im ersten Fehlerfall gewährleistet ist. Es sind auch keine konkreten Informationen vorhanden, die in einfacher Form Aufschluss über die maximale Ausdehnung von isolierten Netzen geben. Jedoch werden in älteren Normen Werte für den Anlagenerder angegeben, die nachfolgend angeführt sind.

In der österreichischen Norm ÖVE-EN 1, Teil 1 aus dem Jahre 1989 wird gefordert: „Der Erdungswiderstand des gesamten Schutzleitungssystems darf **20  $\Omega$**  nicht überschreiten.“<sup>[3]</sup><sup>1</sup>

Für Ersatzstromversorgungsanlagen und andere Stromversorgungsanlagen für den vorübergehenden Betrieb besagt ÖVE-EN 1, Teil 4 § 53 aus dem Jahre 1988: „In IT-Netzen müssen alle Körper durch einen Schutzleiter miteinander verbunden sein. Ein Erdungswiderstand  $R_A \leq 100 \Omega$  ist in jedem Fall ausreichend.“ [4] (siehe auch <sup>1</sup>)

Die deutsche Norm zur Prüfung von elektrischen Anlagen DIN VDE 0100-610 aus dem Jahre 1994 besagt hingegen: „In der Regel ist bei nicht vermaschten Netzen mit Nennleistung des einspeisenden Transformators bis 3,15 MVA und Nennspannung bis 660 V bzw. 1,6 MVA und Nennspannung über 660 bis 1000 V die Wirksamkeit der Schutzmaßnahme beim 1.Fehler auch ohne Messung oder Abschätzung des Ableitstromes bzw. ohne Messung der Erdungsspannung sichergestellt, wenn der Erdungswiderstand  $R_A \leq 15 \Omega$  ist.“ [26] ( <sup>1</sup>)

Die derzeit gültige deutsche Norm DIN VDE 0100-410, Teil 4-41 gibt Bedingungen an, wann ein IT-Netz im ersten Fehlerfall weiterbetrieben werden darf. Diese fordert die Einhaltung der Bedingung (5.2) oder (5.3), damit ein IT-Netz im ersten Fehlerfall (Erdschluss/Isolationsfehler) nicht abgeschaltet werden muss [6].

- In Wechselstromsystemen:

$$R_A \cdot I_d \leq 50 V \quad (5.2)$$

<sup>1</sup>Das Thema Blitzschutz muss dabei immer gesondert betrachtet werden

- In Gleichstromsystemen:

$$R_A \cdot I_d \leq 120 \text{ V} \quad (5.3)$$

Mithilfe dieser Bedingung und der Formel (5.1) für den kapazitiven Fehlerstrom wurde die maximale Ausdehnung  $l_{\max}$  eines 3ph-AC-IT-Netzes berechnet. Die Grenzlänge, für welche bei einem Erdschluss/Isolationsfehler die auftretende Spannung unter den vorgeschriebenen 50 V bleibt, wurde in Abhängigkeit von  $C_E'$  und  $R_A$  mit der Formel (5.4) ermittelt.

$$l_{\max} \leq \frac{50 \text{ V}}{3U_N \omega R_A C_E'} \quad (5.4)$$

$l_{\max}$  maximale Länge eines IT-Netzes, damit die Bedingung (5.2) eingehalten wird

In Abb. 5.4 ist die maximale Ausdehnung eines 3ph-AC-IT-Netzes mit  $U_N = 230 \text{ V}$ , bei ansteigendem Erdkapazitätsbelag  $C_E'$  und bei verschieden hohen  $R_A$  dargestellt.

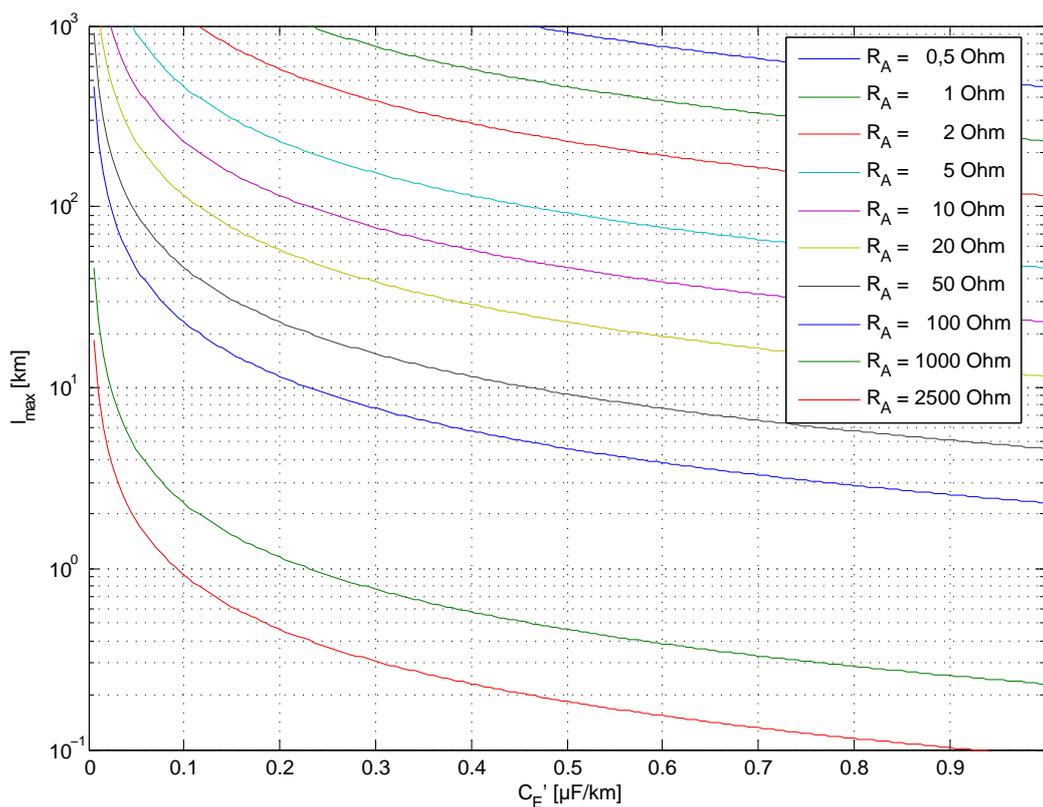


Abbildung 5.4: Maximale Länge eines 3ph-AC-IT-Netzes mit  $U_N = 230 \text{ V}$  welches im ersten Fehlerfall (Erdschluss/Isolationsfehler) noch weiterbetrieben werden darf ( $U_L \leq 50 \text{ V}$ )

Die maximale Netzlänge  $l_{\max}$  nimmt dabei mit steigendem  $C_E'$  stark ab, da mit einem höheren Erdkapazitätsbelag auch der kapazitive Fehlerstrom ansteigt. Ein weiterer wesentlicher Faktor für die maximale Länge ist der Erdungswiderstand  $R_A$ . Je kleiner  $R_A$  ist, desto höher ist die maximal mögliche Netzlänge bei gleich bleibendem  $C_E'$ . Wird der Erdkapazitätsbelag des Laboraufbaus von  $0,14 \mu\text{F}/\text{km}$  als Referenzwert verwendet, liegt die maximale Länge bei schlechten Gegebenheiten (z.B. bei  $R_A = 2500 \Omega$ ) bei nur 659 m. Nimmt man hingegen ein  $R_A$  aus den vorher genannten alten Normen, erhält man wesentlich höhere Werte:

- $R_A = 15 \Omega$  (nach [26]):  $l_{\max} = 109,84 \text{ km}$
- $R_A = 20 \Omega$  (nach [3]):  $l_{\max} = 82,38 \text{ km}$
- $R_A = 100 \Omega$  (nach [4]):  $l_{\max} = 16,48 \text{ km}$

Somit lässt sich sagen, dass bei nicht zu hohen Werten für  $C_E'$  die Grenzen hinsichtlich der Länge für den Weiterbetrieb eines 3ph-AC-IT-Netzes mit  $U_N = 230 \text{ V}$  im ersten Fehlerfall mit üblichen Netzlängen nicht erreicht wird. Voraussetzung dafür ist ein kleiner Anlagenerderwiderstand  $R_A$ . Bei schlechten Erdungsbedingungen, kann die Grenze der maximal möglichen Netzausdehnung schnell erreicht werden.

## 6 Messergebnisse

In diesem Kapitel wird auf die verschiedenen Messungen und ihre Ergebnisse, die am Laboraufbau durchgeführt wurden, eingegangen. Danach werden die einzelnen Messungen erklärt und die erzielten Ergebnisse erläutert und diskutiert. Am Anfang werden dafür drei verschiedene Isolationsüberwachungssysteme (IÜW) näher betrachtet, deren Funktionsweise untersucht wurde. Diese Systeme kamen dann auch bei verschiedenen weiteren Untersuchungen zum Einsatz.

### 6.1 Die untersuchten Isolationsüberwachungssysteme

Die einzelnen IÜW werden hier nach ihrem Einsatzort gegliedert. Es wurden zwei Geräte getestet, die nur für DC-Netze geeignet sind und ein Gerät, welches sowohl für AC als auch zur Überwachung von DC-Netzen geeignet ist. Als erstes werden die beiden Systeme beschrieben, die nur in isolierten Gleichspannungsnetzen eingesetzt werden können.

#### 6.1.1 Widerstandsschaltung für DC-Netze

Dieses IÜW beruht auf einer einfachen symmetrischen Widerstandsschaltung, welche in Abb. 6.1 zu sehen ist. Die Widerstandsschaltung wird oft auch als H-Schaltung bezeichnet.

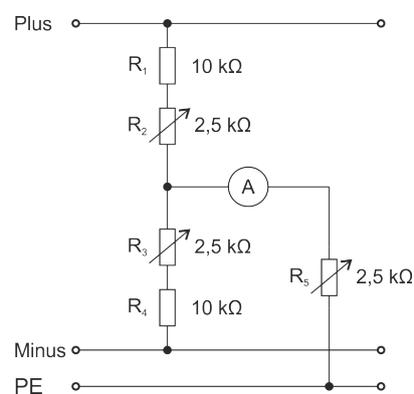


Abbildung 6.1: Widerstandsschaltung

Die Potentiometer  $R_2$  und  $R_3$  werden zum Abgleichen der Widerstandsbrücke verwendet. Dadurch fließt im Normalbetrieb, also bei fehlerfreiem Netz, kein Strom von Plus oder Minus zum PE-Leiter.

Erst bei einem Erdschluss fließt über das Potentiometer  $R_5$  ein Strom und wird am Amperemeter detektiert. Dabei kann über den Widerstandswert von  $R_5$  die Größe des Fehlerstroms geregelt werden. Je größer dabei  $R_5$  eingestellt wird, desto kleiner wird der Erdschlussstrom. Somit ergibt sich eine einfache Möglichkeit der Strombegrenzung im Fehlerfall.

- Funktionsweise:

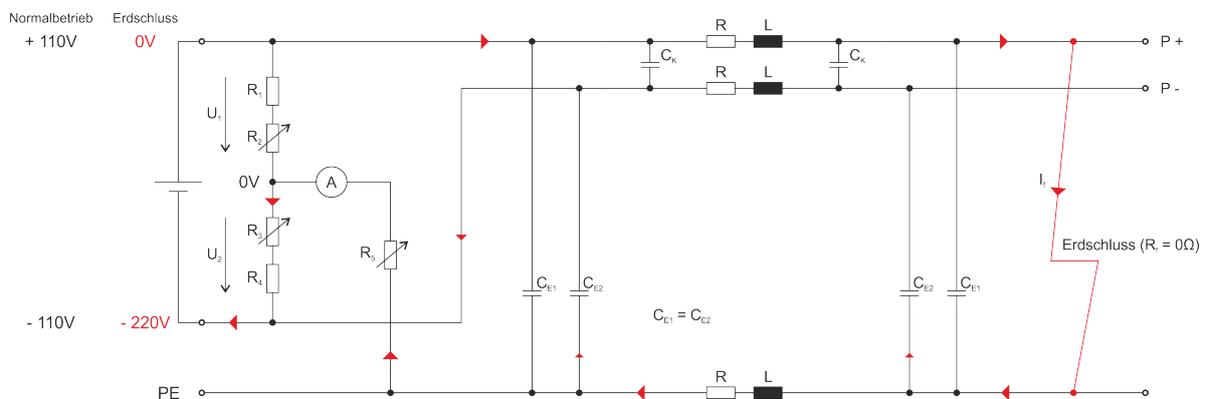


Abbildung 6.2: Erdschluss im DC-Netz mit Widerstandsschaltung

Da die Erdkapazitäten, die Leitungswiderstände und -induktivitäten im Verhältnis zu den Widerständen der Widerstandsschaltung (siehe Abb. 6.1) sehr klein sind, werden diese zur Funktionserklärung vernachlässigt. Bei einem satten Erdschluss ( $R_F = 0 \Omega$ ) von Plus zum PE-Leiter fließt der Fehlerstrom, wie in Abb. 6.2 dargestellt, wobei der Fehlerstrom  $I_F$  vom PE-Leiter über die Erdkapazitäten  $C_{E2}$  und über die Widerstände  $R_5$ ,  $R_3$  und  $R_4$  zur Fehlerstelle zurückfließt. Dadurch kommt es zu einem Ausschlag an der Anzeigeeinrichtung (Volt- oder Amperemeter), wodurch ein Isolationsfehler im Netz signalisiert wird.

Die Höhe des Fehlerstroms hängt im Wesentlichen nur von der Größe der Widerstände  $R_3$ ,  $R_4$  und  $R_5$  der Widerstandsschaltung ab. Bei der in Abb. 6.2 dargestellten Situation, sinkt die Spannung am Plusleiter auf 0 V ab und steigt am Minusleiter auf -220 V an. Dadurch teilt sich die 220 V Versorgungsspannung nach dem Widerstandsverhältnis von  $R_3$  und  $R_4$  zu  $R_5$  auf die Spannungen  $U_2$  und  $U_1$  auf.

Durch diese Spannungsverlagerung bei einem einfachen Erdschluss (Plus oder Minus nach PE) kann auf die fehlerhafte Phase geschlossen werden, da ein Erdschluss am Plusleiter zu

einer Spannungsabsenkung an diesem und gleichzeitig zu einem Ansteigen der Spannung am Minusleiter führt.

Vorteile:

- Die Schaltung ist einfach und unkompliziert.
- Erdschlüsse werden sofort durch einen Ausschlag am Amperemeter angezeigt.
- Es ist keine Stromversorgung notwendig, nur ein Amperemeter wird benötigt (bzw. Voltmeter zur Ermittlung der Spannungsverlagerung).
- Durch die Spannungsverlagerung bei einem Erdschluss kann auf die fehlerhafte Phase geschlossen werden.

Nachteile:

- Die Schaltung ist nur für DC-Netze geeignet.
- Es werden keine Erdschlüsse in einem abgeschalteten Netz registriert.

### 6.1.2 220-V-DC-Systemüberwachung der Firma IMB

Die 220-V-DC-Systemüberwachung besteht aus 4 Überwachungsmodulen, welche unabhängig voneinander eingesetzt werden können. Es gibt jeweils ein Modul zur Überwachung der Netzspannung (mit integrierter Ladegeräteüberwachung), der Symmetrie der Batteriespannung gegenüber Erde, der Verbraucherspannung und zur Erdschlussüberwachung. Außerdem gibt es ein Fernmeldemodul, welches die Fehlermeldungen an externe Stellen weiterleiten kann. In dieser Diplomarbeit wird die Erdschlussüberwachung näher erläutert, da diese zur Isolationsüberwachung von IT-Netzen verwendet werden kann.

- Funktionsweise:

Das Gerät wird zwischen dem Plus- und Minusleiter und dem PE-Leiter angeschlossen. Die Erdschlussüberwachung basiert auf der Funktion der symmetrischen Widerstandsschaltung<sup>1</sup> (siehe Kapitel 6.1.1), d.h. es wird die Größe des Fehlerstroms zur Erde gemessen. Durch den Zeigerausschlag des am Erdschlussmodul eingebauten Voltmeters, kann auf die Höhe des Fehlerstroms geschlossen werden. Vor Ort wird ein Erdschluss sofort durch den Zeigerausschlag am Voltmeter und eine LED am Erdschlussmodul angezeigt. Aber erst wenn ein Erdschluss für rund 2 s permanent bestehen bleibt, setzt das Fernmeldemodul eine Fehlermeldung ab.

---

<sup>1</sup>Nach Rückfrage bei der Firma IMB

Die fehlerbehaftete Phase wird durch die Polarität des Zeigerausschlags des Voltmeters und eine LED am Modul der Erdschlussüberwachung angezeigt.

Vorteile:

- Erdschlüsse werden sofort durch einen Ausschlag am Voltmeter angezeigt.
- Zeigerausschlag gibt Hinweis auf die Größe des Fehlerstroms.
- Integrierte manuelle Überprüfung, ob der Erdschluss tatsächlich an der vermuteten Phase vorliegt.

Nachteile:

- Die Erdschlussüberwachung kann nur in DC-Netzen eingesetzt werden.
- Fernmeldung eines Erdschlusses erfolgt erst, wenn dieser für 2 s permanent bestehen bleibt.
- Es werden keine Erdschlüsse in einem abgeschalteten Netz registriert.

### 6.1.3 IRDH575B1-435 der Firma Bender

Das IÜW der Firma Bender kann universell in AC, AC/DC und DC-Netzen eingesetzt werden. Es besitzt den größten Funktionsumfang, wobei viele Parameter vom Benutzer eingestellt werden können. Bei diesem System wird zur Isolationsüberwachung das AMP<sup>Plus</sup> - Messverfahren verwendet. Dies ist ein von Fa. Bender entwickeltes und patentiertes Messverfahren.

Dabei wird der Versorgungsspannung, egal ob Gleich- oder Wechselspannung, eine pulsartige Messwechselspannung überlagert. Diese besteht aus positiven und negativen Pulsen gleicher Amplitude. Die Periodendauer des Messpulses hängt von der Größe der Erdkapazitäten, also der Netzgröße, und dem Isolationswiderstand des IT-Netzes ab. In reinen AC-Netzen besteht zusätzlich die Möglichkeit, ein DC-Messverfahren zu verwenden, welches sich durch eine kürzere Messzeit auszeichnet.<sup>2</sup> Das IÜW wird zwischen die Leiter der Stromversorgung und dem PE-Leiter angeschlossen. Durch einen Erdschluss wird der Messkreis zwischen IT-System und Erde geschlossen. Das IRDH ermittelt den neuen Isolationswiderstand des Netzes und signalisiert nach dieser sogenannten Messwerterfassungszeit den Isolationsfehler mithilfe einer LED und einer Displayanzeige. Die Messwerterfassungszeit ist dabei von der Größe der

---

<sup>2</sup>Bedienungshandbuch A-Isometer IRDH575 von Bender

Erdkapazitäten, dem Isolationswiderstand, sowie eventuell auftretenden netzbedingten Störungen abhängig.

Bei diesem IÜW können zwei Ansprechwerte eingestellt werden. Unterschreitet der Isolationswiderstand den jeweiligen Schwellwert, spricht das zugehörige Alarm LED/Relais an. Nach Unterschreiten des niedrigeren Ansprechwertes startet das IRDH die Fehlerortung.

Mithilfe des Isolationsfehler-Auswertegerätes der Reihe EDS4xxx und den daran angekoppelten Messstromwandlern kann durch den Prüfstrom der Fehlerort selektiv bestimmt werden. Die Höhe des Prüfstroms kann am IRDH eingestellt werden, wobei die Werte 1, 2.5, 10, 25 oder 50 mA gewählt werden können.

- Funktionsweise im DC-Netz:

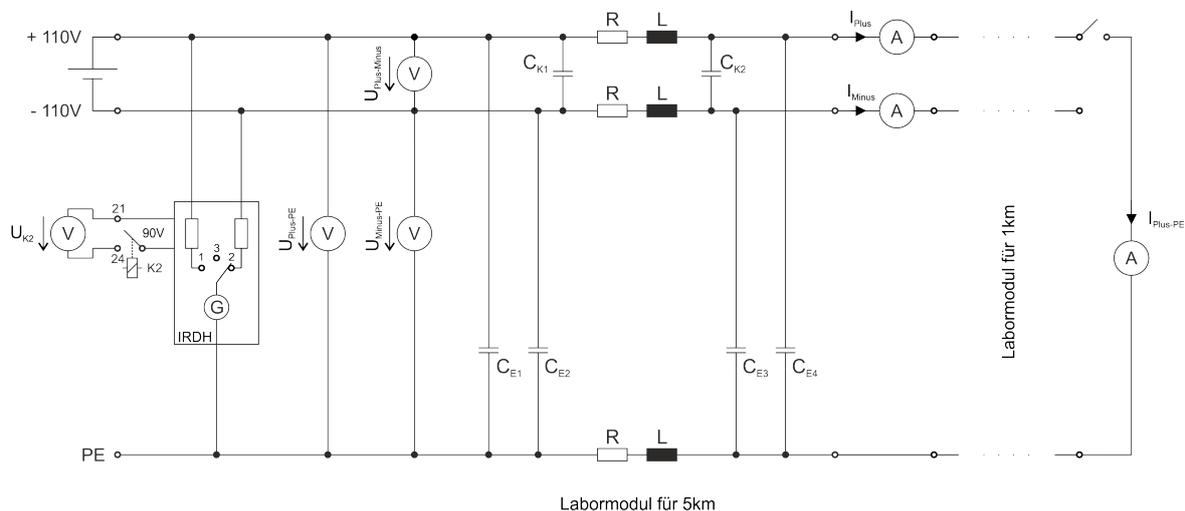


Abbildung 6.3: DC IT-Netz mit IRDH575

In Abb. 6.4 sind die Spannungs- und Stromverläufe des in Abb. 6.3 skizzierten Netzes zu sehen. Bis zum Zeitpunkt  $t_1$  ist ein fehlerfreies Netz vorhanden. Am Plus- und Minusleiter liegt die Versorgungsspannung  $\pm 110\text{ V}$  mit der überlagerten pulsformigen Messwechselspannung an. Die Spannung  $U_{\text{Plus-Minus}}$  beträgt immer  $220\text{ V}$ , und es fließt kein Strom über die Leiter gegen Erde.

Durch den Erdschluss vom Plus- auf den PE-Leiter zum Zeitpunkt  $t_1$  sinkt  $U_{\text{Plus-PE}}$  auf  $0\text{ V}$  ab und  $U_{\text{Minus-PE}}$  steigt auf  $-220\text{ V}$  an. Dadurch entladen sich die Erdkapazitäten, was sich am Anfang mit einer kleinen Stromspitze bei  $t_1$  bemerkbar macht. Der Entladestrom erreicht dann einen kleinen stationären Wert welcher zum Zeitpunkt  $t_3$  endgültig verschwindet.

Im Diagramm ist der Strom  $I_{Plus}$  nahezu deckungsgleich mit  $I_{Plus-PE}$ .

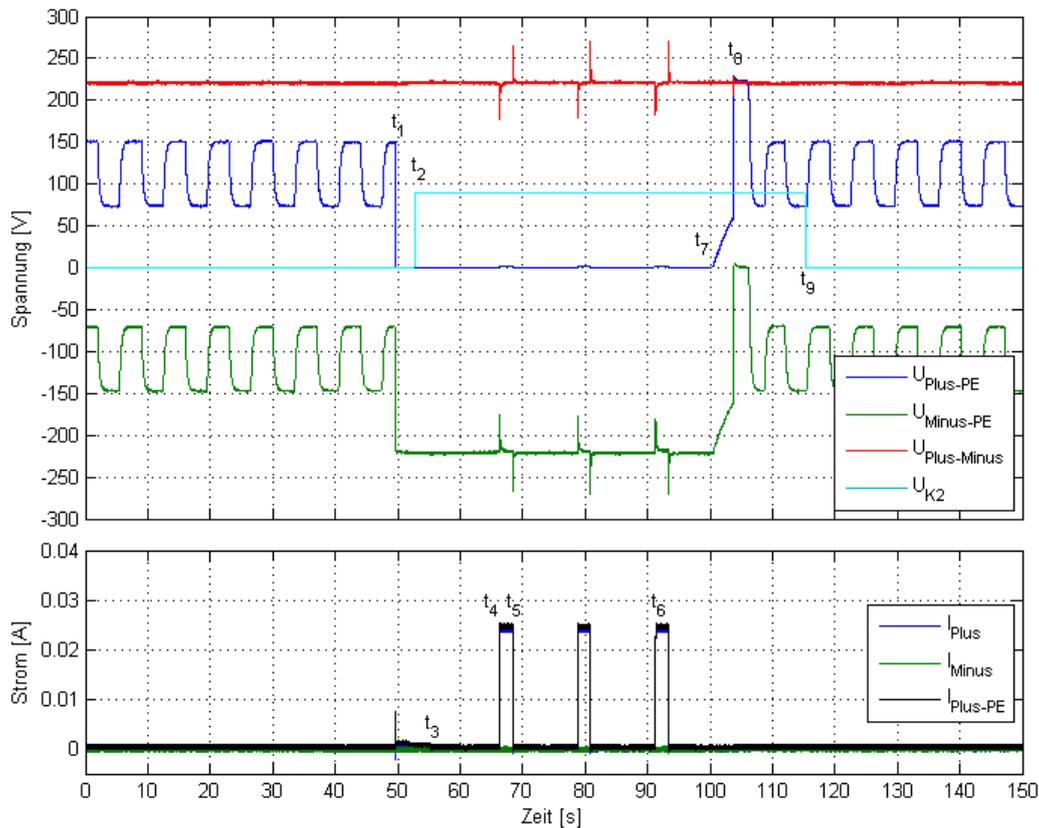


Abbildung 6.4: Spannungs- und Stromverläufe im DC IT-Netz mit IRDH575

Bei  $t_2$  zieht das Alarm-Relais K2 an, d.h das IÜW hat einen Isolationsfehler im Netz erkannt und gleichzeitig gemeldet. Bei dieser Netzkonstellation benötigt damit das IRDH die Zeit  $t_1$  bis  $t_2$  zur Erkennung des Erdschlusses. Nach dieser Messwerterfassungszeit startet die Isolationsfehlersuche.

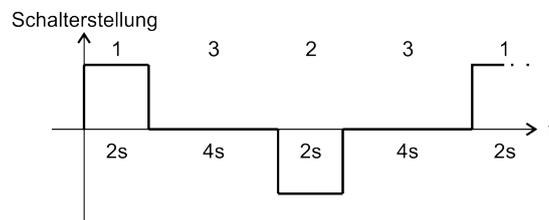


Abbildung 6.5: Prüftakt des IRDH575; Quelle: [22]

Zur Erdschlussortung wird die Schalterstellung (Position 1, 2 oder 3) des in Abb. 6.3 dargestellten Schalters im IRDH nach dem Prüftakt in Abb. 6.5 gewechselt.

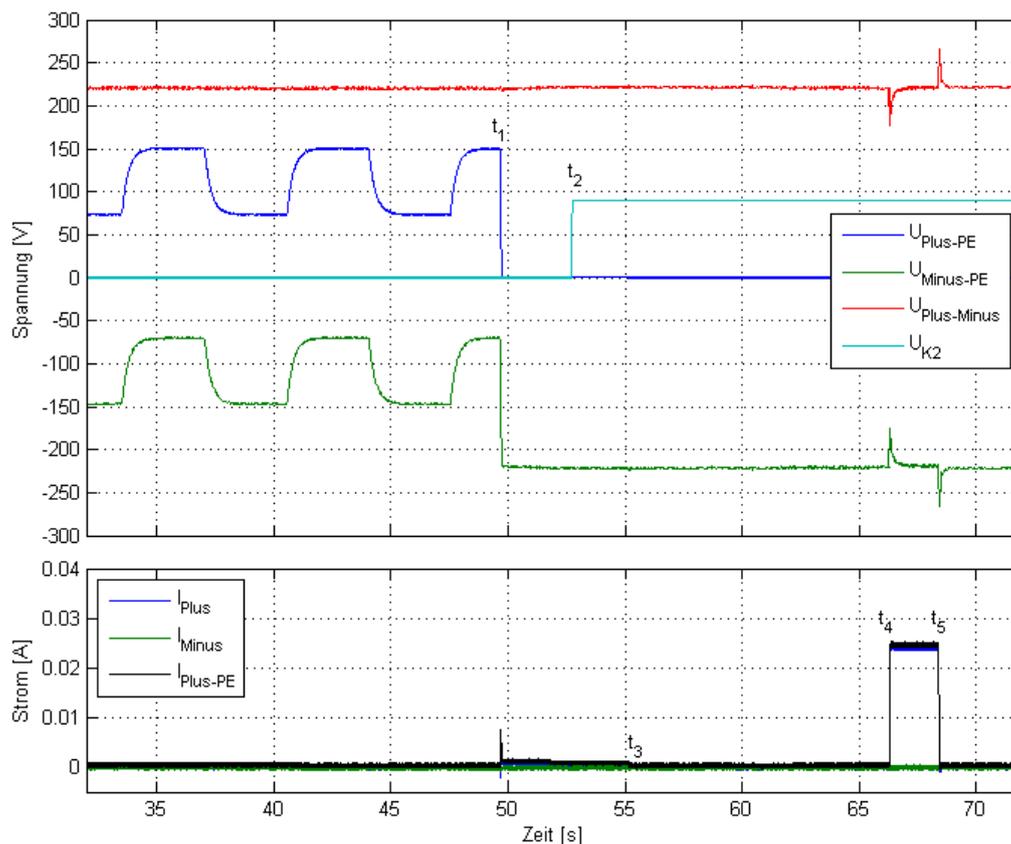


Abbildung 6.6: Eintritt eines Erdschlusses, Ausschnitt aus Abb. 6.4

Bei der Position 2 zum Zeitpunkt  $t_4$  ergibt sich ein geschlossener Stromkreis über den Erdschluss und den Widerstand des IRDH. Dadurch treibt die Netzspannung den sogenannten Prüfstrom, der im IRDH auf 25 mA eingestellt wurde. Durch diesen hochohmigen Kurzschluss von der Phase mit der negativen Versorgungsspannung über den Widerstand des IRDH nach PE bricht  $U_{\text{Plus-Minus}}$  kurzzeitig ein und die Kapazitäten werden damit aufgeladen. Nach 2 s zum Zeitpunkt  $t_5$  ist der Stromkreis wieder unterbrochen, dadurch steigt die Spannung  $U_{\text{Plus-Minus}}$  kurzzeitig an und die Kapazitäten werden entladen.

Bei  $t_6$  wird erneut Schalterstellung 2 erreicht und die Netzspannung treibt einen Prüfstrom (siehe Abb. 6.7). Sind an allen Abgängen des DC IT-Netzes Messstromwandler angeschlossen, wird dieser Prüfstrom nur am fehlerbehafteten Abgang erkannt und dieser kann somit geortet werden.

Zum Zeitpunkt  $t_7$  ist der Erdschluss zu Ende und die Spannung an den beiden Phasen Plus und Minus beginnt, auf den Ausgangszustand  $\pm 110$  V zurückzukehren.

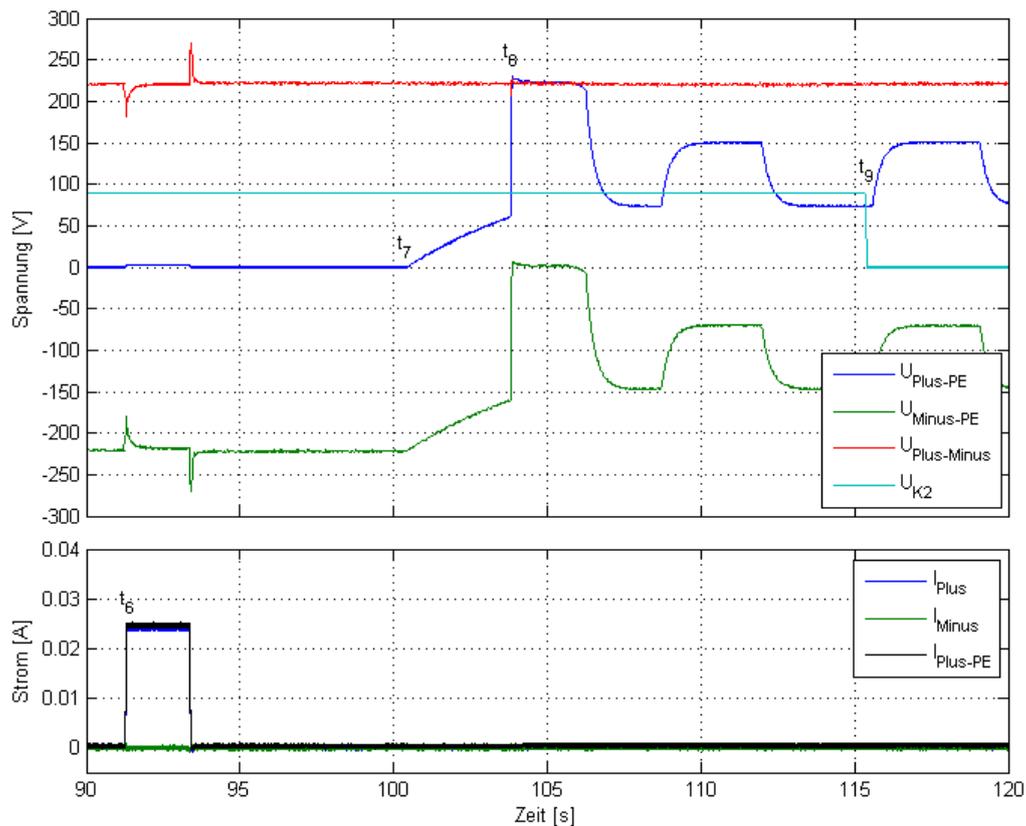


Abbildung 6.7: Ende des Erdschlusses, Ausschnitt aus Abb. 6.4

Nach 10 s ab dem Ende des letzten Prüfstromimpulses befindet sich der Schalter wieder auf Position 2 (bei  $t_8$ ), dadurch ergibt sich ein hochohmiger Kurzschluss von Minus nach PE. Dadurch steigt  $U_{\text{Plus-PE}}$  auf 220 V an und  $U_{\text{Minus-PE}}$  auf 0 V. Erst ab dem Zeitpunkt  $t_9$  erkennt das IRDH ein fehlerfreies Netz und das Alarm-Relais K2 fällt ab.

Zu beachten ist, dass die Amplitude des Prüfstroms (siehe  $t_6$ ) wesentlich größer ist verglichen zur kurzzeitigen kleinen Stromspitze zum Zeitpunkt des Fehlereintritts bei  $t_1$ . Deshalb muss in Netzen mit sensiblen Sensoren oder Gebern darauf geachtet werden, dass der Prüfstrom nicht zu hoch gewählt wird. Sonst könnte es zu Fehlfunktionen oder -auslösungen durch diesen kommen.

- Funktionsweise im 3ph-AC-Netz:

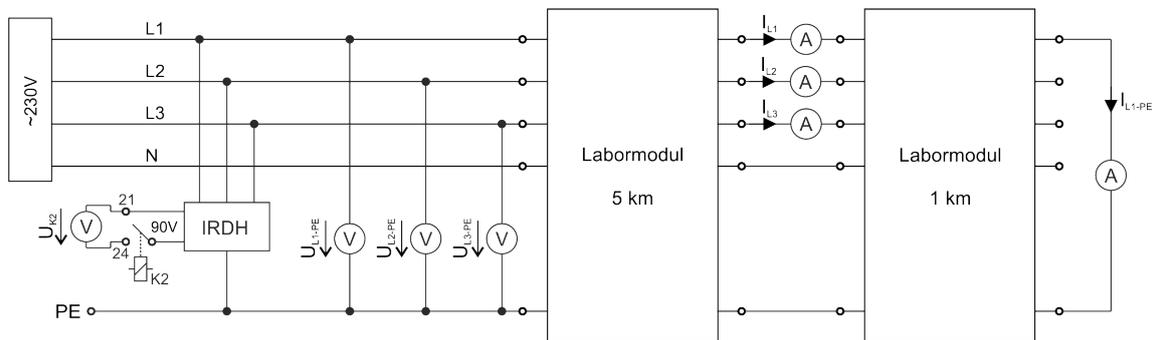


Abbildung 6.8: 3ph-AC-IT-Netz mit IRDH575

In der Abb. 6.9 sind die Maximalwerte der Spannungen und Ströme pro Periode des in Abb. 6.8 dargestellten IT-Netzes zu sehen. Das Netz wurde dabei mit 230 V Wechselspannung versorgt und ein IRDH575 wurde als IÜW eingesetzt. Zur besseren Übersichtlichkeit werden in den folgenden Abbildungen die Maximalwerte von Spannung und Strom dargestellt.

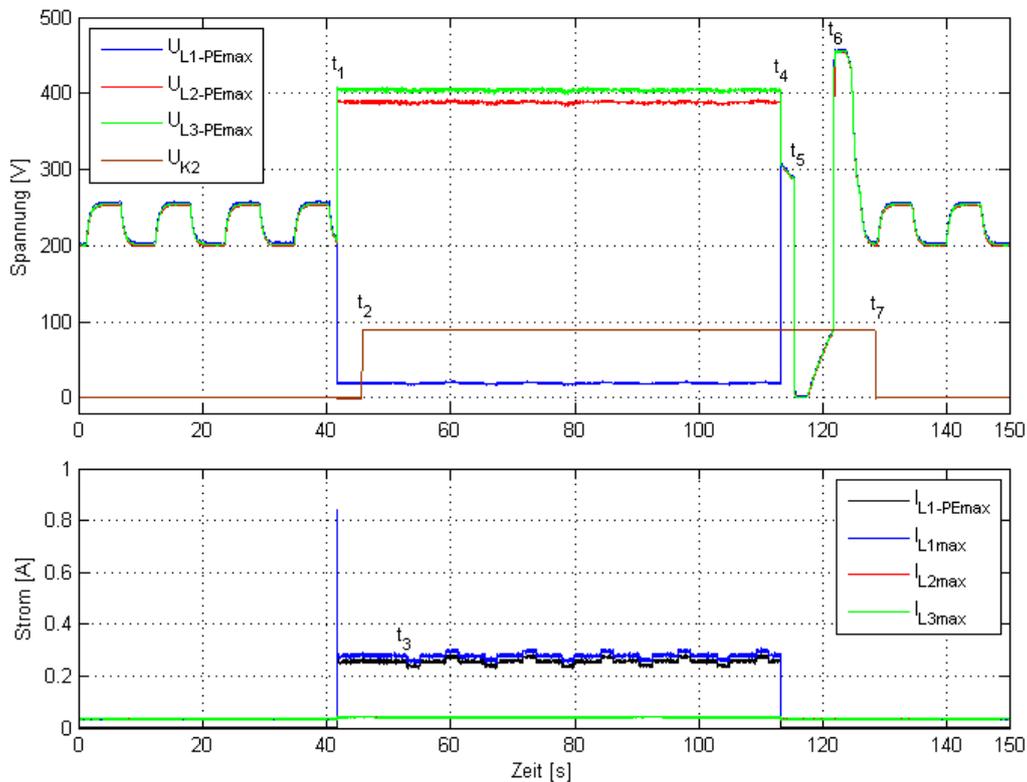


Abbildung 6.9: Spannungs- und Stromverläufe im 3ph-AC-IT-Netz mit IRDH

Zwischen den Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_4$  tritt ein Erdschluss von L1 zum PE-Leiter auf. Im fehlerfreien Netz betragen die Phasenspannungen 230 V plus der überlagerten pulsformigen Messwechselspannung des IRDH. Im Gegensatz zum DC-Netz fließt hier auch im Normalbetrieb ein stationärer kapazitiver Strom von rund 29 mA auf allen 3 Phasen des unbelasteten und 6 km langen IT-Netzes.

Wie oben schon erwähnt, tritt zum Zeitpunkt  $t_1$  ein Erdschluss (L1 nach PE) auf. Dadurch bricht die Spannung  $U_{L1-PEmax}$  ein und die Spannungen  $U_{L2-PEmax}$  und  $U_{L3-PEmax}$  steigen auf die verkettete Spannung an. Durch das schlagartige Entladen der Erdkapazitäten tritt eine Stromspitze auf. Danach stellt sich ein stationärer kapazitiver Fehlerstrom von rund 251 mA ein, der von der Phase L1 über die Fehlerstelle zum PE-Leiter fließt. Nach der Messwerterfassungszeit registriert das IRDH einen Erdschluss, das durch das Anziehen des Alarm-Relais K2 zum Zeitpunkt  $t_2$  gekennzeichnet ist. Gleichzeitig zeigt das IÜW über das Display und eine LED den Isolationsfehler an.

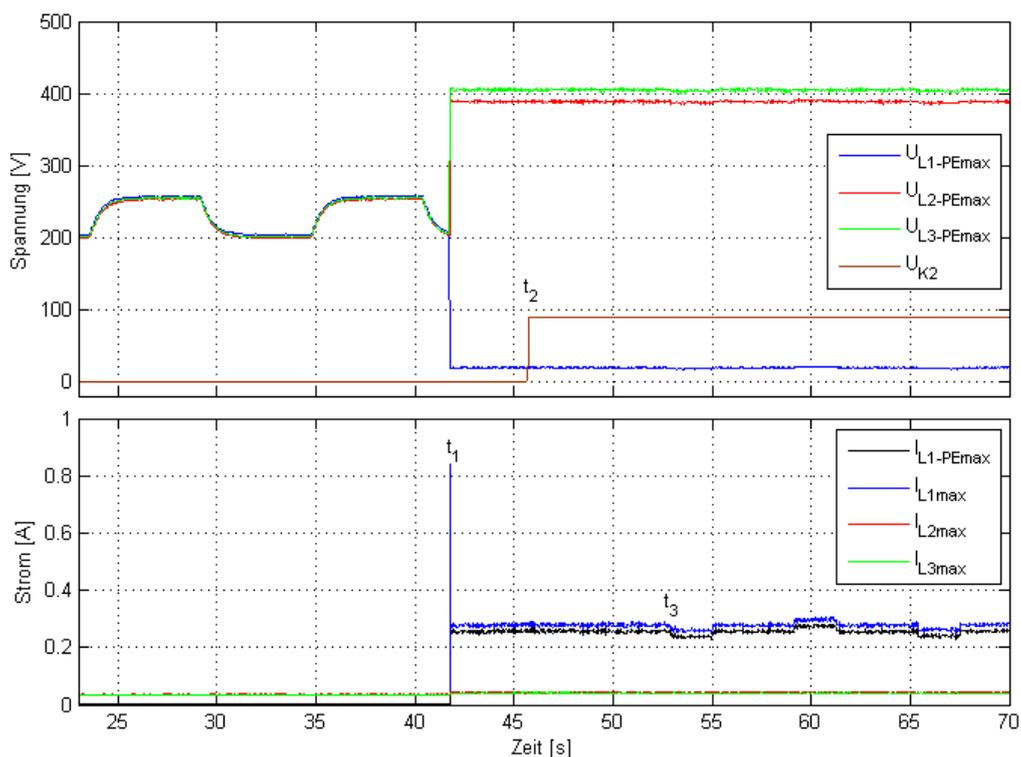


Abbildung 6.10: Eintritt eines Erdschlusses, Ausschnitt aus Abb. 6.9

Bei  $t_3$  startet die Isolationsfehlersuche mit dem Prüftakt, wie er in Abb. 6.5 dargestellt ist.

Jedoch wird hier nicht wie beim DC-Netz zwischen Plus- und Minusleiter hin und her geschaltet, sondern auf allen 3 Phasen gleichzeitig getaktet. Dabei kann nur auf der fehlerbehafteten Phase dieser von der Netzspannung getriebene Prüfstrom auch fließen.

Zum Zeitpunkt  $t_4$  ist der Erdschluss zu Ende, dadurch kehren die Phasenspannungen zu ihrem Anfangswert zurück. Das IRDH hingegen registriert erst zum Zeitpunkt  $t_7$  ein fehlerfreies Netz und dadurch dauert die Isolationsfehlersuche an.

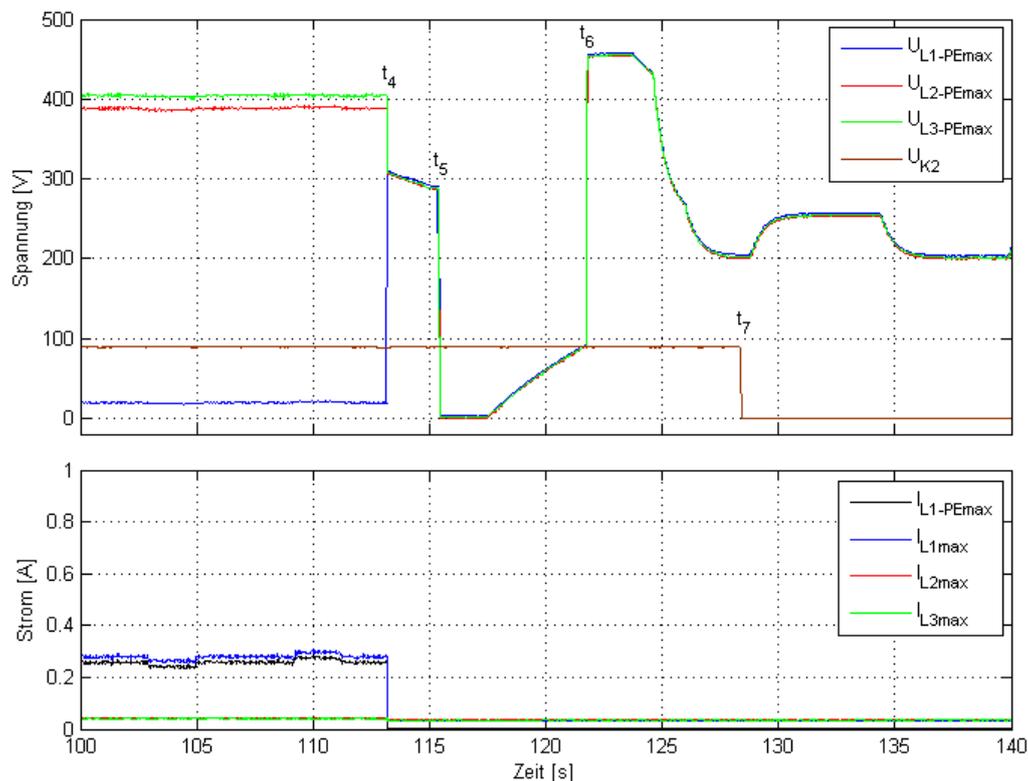


Abbildung 6.11: Ende des Erdschlusses, Ausschnitt aus Abb. 6.9

Dies macht sich zum Zeitpunkt  $t_5$  und  $t_6$  durch das Einbrechen und Ansteigen aller Phasenspannungen bemerkbar. Dies geschieht immer während der zwei Sekunden in denen sich der Schalter in der Position 3 und 1 befindet. Erst bei  $t_7$  fällt das Alarm-Relais K2 ab und es stellt sich wieder die 230V Phasenspannung mit der überlagerten Messwechselfspannung ein.

Vorteile:

- Universell einsetzbares Gerät für AC, 3ph-AC, AC/DC und DC-Netze.

- Das IRDH erkennt Erdschlüsse auch bei abgeschalteten AC, 3ph-AC und DC IT-Netzen.
- In Verbindung mit dem Isolationsfehler-Auswertegerät der Reihe EDS4xxx ist eine selektive Fehlerortung möglich.

Nachteile:

- Das IRDH benötigt eine Stromversorgung.
- Das System meldet und erkennt Erdschlüsse und nach einem Erdschluss wieder fehlerfreie Netze erst nach einer gewissen Messwerterfassungszeit.
- Bei Einsatz des IRDH in IT-Netzen mit sensiblen Geräten muss auf die Höhe des Prüfstroms geachtet werden, damit es zu keinen Fehlfunktionen/-auslösungen durch diesen kommt.<sup>3</sup>

## 6.2 Erfassungszeit eines Erdschlusses im DC IT-Netz

Bei diesen Messungen galt es, die Zeit zu ermitteln, die das IÜW IRDH575 der Firma Bender in einem DC IT-Netz bei unterschiedlicher Netzausdehnung benötigt, um einen Erdschluss zu erkennen.

Dabei wurde ein Erdschluss mit  $R_F = 0,1 \Omega$  gesteckt und die Zeit ermittelt, die vom Eintritt des Fehlers bis zur Erkennung dessen durch das IRDH vergeht.

### 6.2.1 Messverfahren

In der nachfolgenden Abb. 6.12 ist der Versuchsaufbau zur Ermittlung der Zeit dargestellt. Ein Omicron CMC 256-6 diente zur Versorgung des Laboraufbaus mit 110 V Gleichspannung und zur Erfassung der Zeiten. Ein Dewe-3020 wurde zur Messung der Spannung von Plus nach PE ( $U_{\text{Plus-PE}}$ ) verwendet.

Am Omicron CMC 256-6 wurden zwei Trigger verwendet, um die jeweilige Zeitmessung zu stoppen, aus denen die Fehlererkennungszeit ermittelt wurde. Am Eingang des Triggers von Kanal 1 lag die Strommessung von Plus nach PE an, d.h. sobald ein Fehler (zwischen Plus und PE) gesteckt wurde konnte an diesem Kanal ein Strom gemessen werden. Wurde also ein Erdschluss simuliert, überschritt der Strom am Kanal 1 einen gewissen Schwellwert und

<sup>3</sup>wird auch im Bedienungshandbuch des EDS460-DG (von Bender) angemerkt

damit beendete der Trigger die erste Zeitmessung. Somit wurde die Zeit gemessen, die vom Einschalten der Versorgungsspannung am Omicron bis zum Fehlereintritt verging.

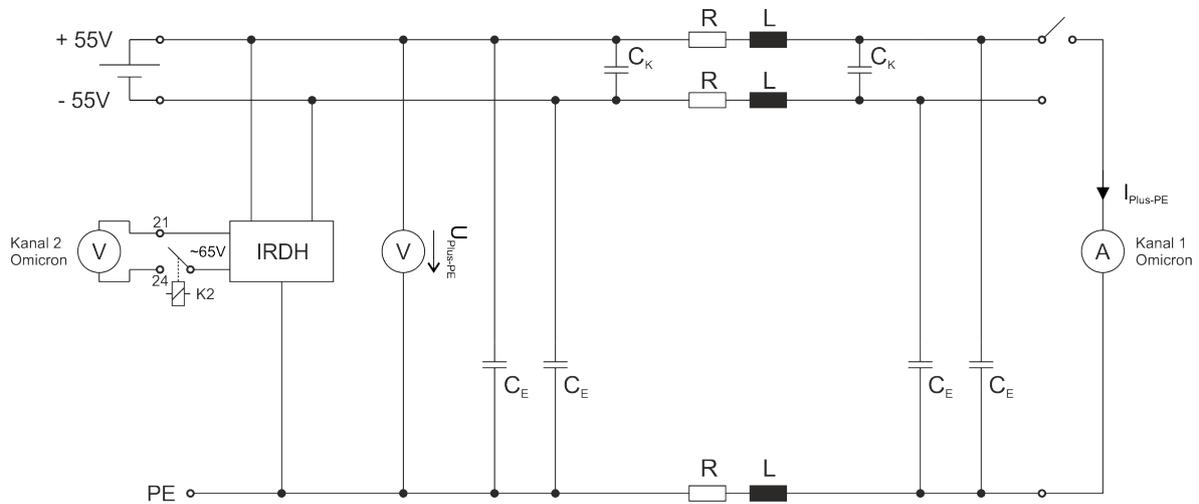


Abbildung 6.12: Versuchsanordnung zur Zeitermittlung

Die zweite Zeitmessung erfasste die Zeit, die vom Einschalten der DC - Versorgungsspannung durch das Omicron bis zur Erkennung des Fehlers durch das IRDH verging. Dabei schaltete der zweite Trigger die Zeitmessung ab, wenn die gewählten 65 V Wechselspannung durch das Anziehen des Alarm-Relais K2 an das Omicron durchgeschaltet wurden. Das Alarm-Relais K2 zog genau dann an, wenn das IRDH einen Isolationsfehler von  $< 10 \text{ k}\Omega$  erkannte (da für den Alarm 2:  $10 \text{ k}\Omega$  beim IRDH eingestellt wurden). Aus der Differenz der beiden Zeiten ergab sich jene Zeit, die das IRDH benötigt, um einen Isolationsfehler zu erfassen.

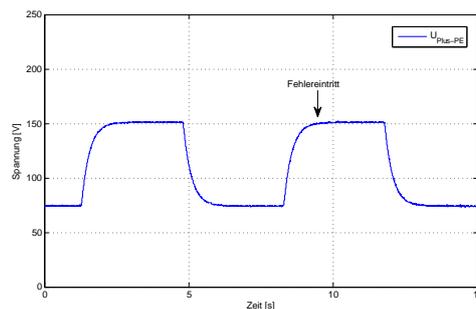


Abbildung 6.13: Zeitpunkt des Fehlereintritts

Da die Erkennungszeit auch bei gleicher Netzausdehnung stark schwankt, wurde die Spannung  $U_{\text{Plus-PE}}$  gemessen. Damit konnte immer zum selben Zeitpunkt des Spannungsimpulses, den IRDH generiert, der Erdschluss gesteckt werden (siehe Abb. 6.13). Somit konnten die

ermittelten Fehlererkennungszeiten bei unterschiedlichen Netzlängen gegenübergestellt werden.

## 6.2.2 Messergebnisse

Der Fehler am Laboraufbau wurde immer zum selben Zeitpunkt des Spannungsimpulses gesteckt. Der Erdschluss wurde manuell gesteckt, weshalb es zu kurzen zeitlichen Schwankungen kam. Deshalb wurden bei jeder einzelnen Netzlänge vier Messungen durchgeführt und daraus der Mittelwert gebildet, um diese zeitlichen Schwankungen beim Fehlereintritt zu minimieren. Eine Übersicht über die Schwankungsbreite der ermittelten Erdschluss-Erkennungszeit bei 7 km Netzlänge ist in Tab. 6.1 zu sehen.

Messung	Erdschluss-Erkennungszeit [s]
a	2,78
b	2,77
c	2,80
d	2,89

Tabelle 6.1: Ermittelte Erdschluss-Erkennungszeiten bei 7 km Netzlänge

Die Erdschluss-Erkennungszeit bei 7 km Netzlänge ist der Mittelwert aus diesen 4 Messungen (siehe Formel 6.1).

- Erdschluss-Erkennungszeit bei 7 km:

$$t_{7km} = \frac{t_{a_7km} + t_{b_7km} + t_{c_7km} + t_{d_7km}}{4} = \underline{2,81s} \quad (6.1)$$

Zu beachten ist, dass beim IRDH die maximale Netzableitkapazität  $C_{E_{max}}$  eingestellt werden kann. Die Werkseinstellung beträgt  $150 \mu F$ , diese wurde für die Messungen verwendet. Die  $150 \mu F$  würden am Laboraufbau, bei dem als Basis ein  $C_E'$  von  $0,14 \mu F/km$  verwendet wurde, einer Leitungslänge von  $1071,42 km$  entsprechen. Der zweite mögliche Wert ist  $500 \mu F$ , bei diesem erhöht sich die Grundmesszeit aber auf ca.  $10 s$ .<sup>4</sup> In Tab. 6.2 sind die Zeiten aufgelistet, die das IRDH benötigt, um einen Isolationsfehler zu erfassen.

<sup>4</sup>Bedienungshandbuch A-Isometer IRDH575 von Bender

Netzausdehnung [km]	Fehlererkennungszeit [s] Mittelwert aus 4 Messungen
0,02	2,09
0,05	2,10
0,1	2,08
0,15	2,10
0,35	2,10
1	2,15
2	2,16
5	2,44
6	2,69
7	2,81
10	3,10
11	3,15
12	3,17
15	3,51
17	3,77
22	3,97

Tabelle 6.2: IRDH Erdschluss - Erkennungszeit

Wie aus dem Diagramm in Abb. 6.14 ersichtlich ist, steigt die Fehlererkennungszeit fast linear mit der Netzausdehnung an.

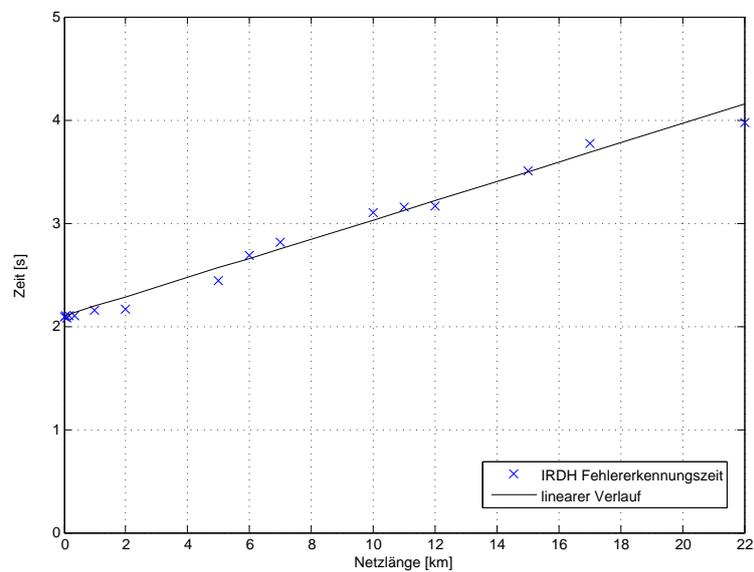


Abbildung 6.14: Erdschluss-Erkennungszeit bei unterschiedlicher Netzausdehnung

Bei geringer Netzlänge beträgt die Fehlererkennungszeit ca. 2,1 s und steigt mit größer werdendem Netz auf 4 s bei 22 km an. Die in Tab. 6.2 angegebenen Werte wurden bei einem Fehlereintritt, wie in Abb. 6.13 dargestellt ist, ermittelt. Je nachdem, zu welchem Zeitpunkt des Impulses ein Fehler eintritt, kann diese Zeit aber auch kürzer oder länger ausfallen.

Bei der Auswahl eines geeigneten IÜW für ein IT-Netz ist es somit relevant zu evaluieren, ob diese lange Erfassungszeit akzeptiert werden kann oder ein schnelleres System geeigneter wäre.

## 6.3 Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen in IT-Netzen

In einem IT-Netz muss ein IÜW installiert werden (siehe Kap. 3.5). Dies soll bei Auftreten eines ersten Fehlers (Erdschluss/Isolationsfehler) das Unterschreiten eines Mindestwertes des Isolationswiderstandes optisch oder akustisch anzeigen. Bei Eintritt eines zweiten Fehlers, der sich auf einem anderen Außenleiter ereignet, muss die Stromversorgung unverzüglich abgeschaltet werden. Dazu werden Überstrom-Schutzeinrichtungen verwendet.

Bei besonderen Begebenheiten (z.B. ausgedehnte Industrienetze) kann ein zweiter Fehler dazu führen, dass die notwendige Ausschaltbedingung der Überstrom-Schutzeinrichtung nicht eingehalten werden kann. In diesem Fall ist ein zusätzlicher Potenzialausgleich herzustellen [5]. Als zusätzlichen Schutz können in isolierten Netzen auch Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen verwendet werden (siehe Abb. 3.7).

Zu beachten ist, dass dabei immer die Bedingungen, die im zweiten Fehlerfall eine rechtzeitige Abschaltung des fehlerbehafteten Anlagenteils gewährleisten, eingehalten werden (siehe Kap. 3.5).

### 6.3.1 Funktionsweise von RCDs in wirksam geerdeten Netzen

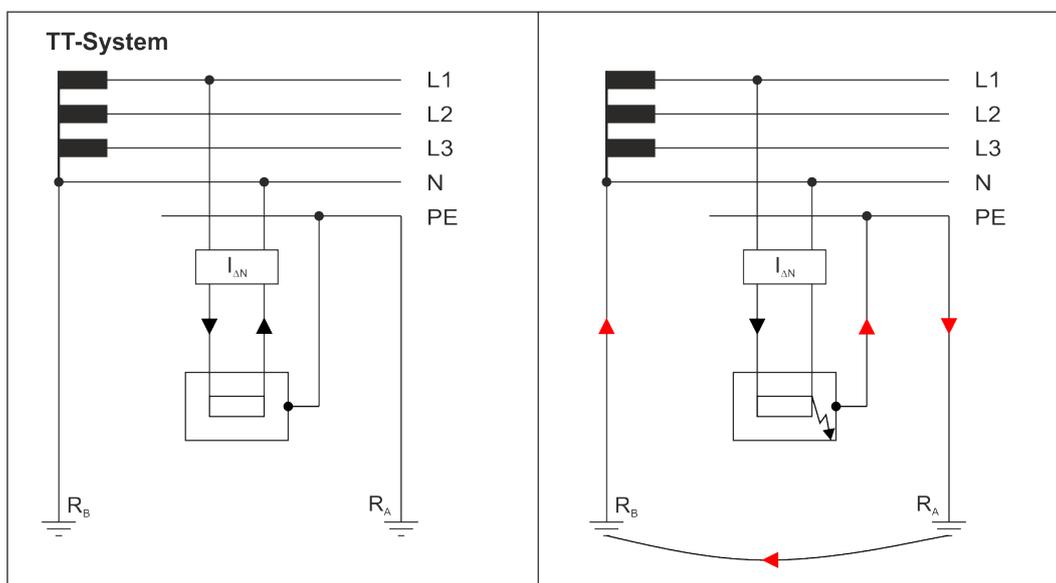


Abbildung 6.15: Funktionsweise von RCDs am Bsp. einer einphasigen RCD (links: fehlerfreies Netz, rechts: Erdschluss)

Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen überwachen den Fehlerstrom gegen Erde. Wenn dieser den Nennwert des Auslösefehlerstroms  $I_{\Delta N}$  übersteigt wird der nachgeschaltete Stromkreis abgeschaltet [5].

Dabei vergleicht die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung die Summe der zu- und abfließenden Ströme des zu überwachenden Anlagenteils. Ist die Differenz Null, ist kein Fehler gegen Erde im Netz vorhanden und es kommt zu keiner Auslösung (siehe Abb. 6.15 links). Bei einem Erdschluss/Isolationsfehler ist die Stromsumme nicht Null, da sich die zu- und abfließenden Ströme nicht mehr aufheben. Es fließt ein Differenzstrom über Erde (siehe Abb. 6.15 rechts). Ist dieser Differenzstrom größer als  $I_{\Delta N}$  muss die RCD auslösen.

### 6.3.1.1 Arten von RCDs

Durch die verschiedenen elektronischen Schaltungen, die in einem Stromkreis oder Abzweig zum Einsatz kommen, treten bei einem Fehlerfall unterschiedliche Fehlerstromformen auf. Die RCDs werden dabei hinsichtlich der Art von Fehlerströmen, die sie erfassen können, unterteilt. RCDs des Typs AC werden als wechselstromsensitiv, des Typs A als pulsstromsensitiv und des Typs B als allstromsensitiv bezeichnet. In Tab. 6.3 sind unterschiedliche Schaltkreise mit ihren möglichen Last- und Fehlerströmen und den dazu geeigneten Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen dargestellt. Die dargestellten Last- und Fehlerströme gelten für ein gedertes Niederspannungsnetz.

Um die Selektivität bei Reihenschaltung von RCDs zu gewährleisten, gibt es Geräte mit unterschiedlich hohem  $I_{\Delta N}$  und solche, die verzögert auslösen. Die übliche Bauart löst bei einem Fehlerstrom, der größer ist als der Nennfehlerstrom, unverzüglich aus. Die Bauart G ist kurzzeitverzögert und die Bauart S (selektiv) weist eine etwas größere Verzögerung als Bauart G auf.

Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen können in einem Bereich von 50 - 100 % des  $I_{\Delta N}$  auslösen. Bei einem Differenzstrom größer als  $I_{\Delta N}$  müssen diese auslösen. In den Abb. 6.16 und 6.17 sind die typischen Auslösecharakteristiken von unverzögerten und verzögerten RCDs der Firma Schrack dargestellt. In Abb. 6.18 ist der Auslösefrequenzgang einer allstromsensitiven RCD der Firma Schrack mit  $I_{\Delta N} = 0,3$  A ersichtlich. Diese drei Typen wurden auch bei den nachfolgenden Messungen eingesetzt.

Geeigneter FI-Typ			Schaltung	Laststrom	Fehlerstrom			
<b>B</b> 	<b>A</b> 	<b>AC</b> 	1					
			2					
			3					
			4					
			5					
			6					
					7			
					8			
					9			
					10			

Tabelle 6.3: Arten von Fehlerströmen und dazu geeignete RCDs [24]

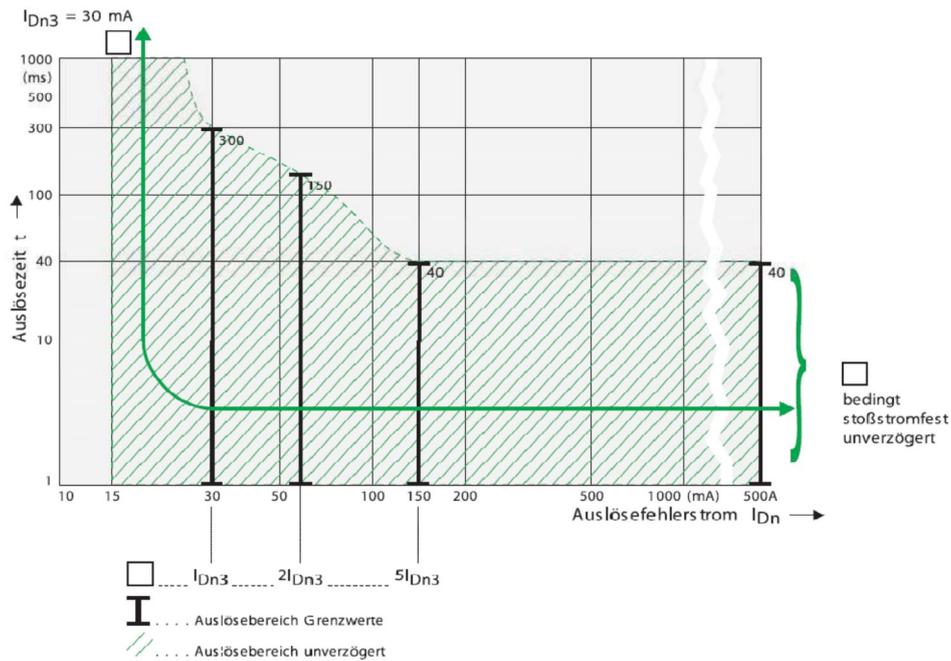


Abbildung 6.16: Typische Auslösecharakteristik von unverzögerten RCDs; Quelle: Datenblatt „Fehlerstromschutzschalter 25 - 100 A, Serie BCF0“ Firma Schrack

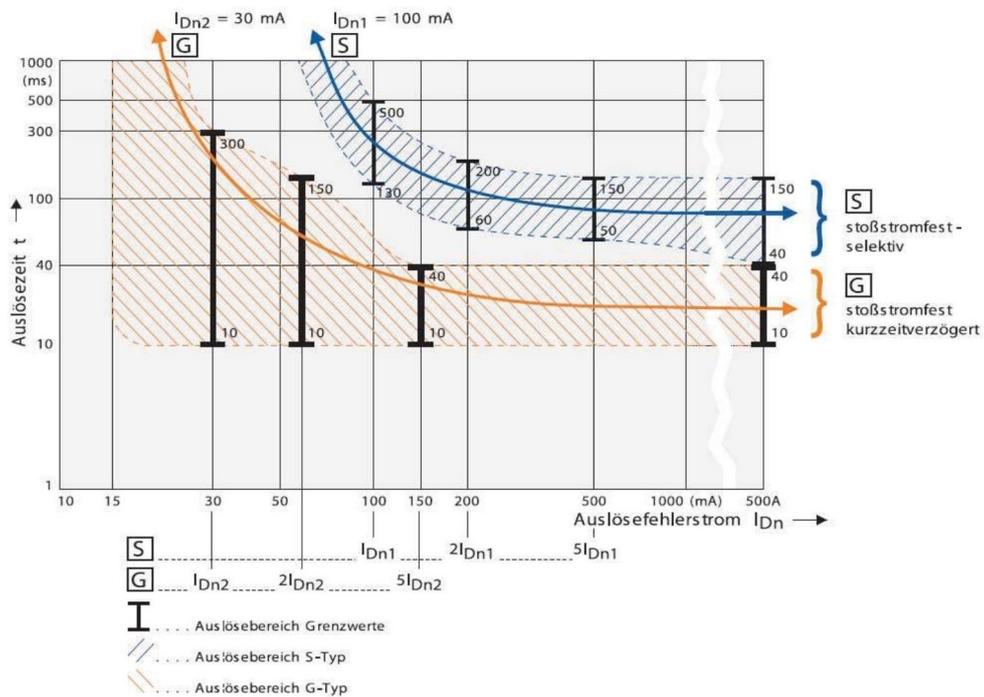


Abbildung 6.17: Typische Auslösecharakteristik von verzögerten RCDs; Quelle: Datenblatt „Fehlerstromschutzschalter 25 - 100 A, Serie BCF0“ Firma Schrack

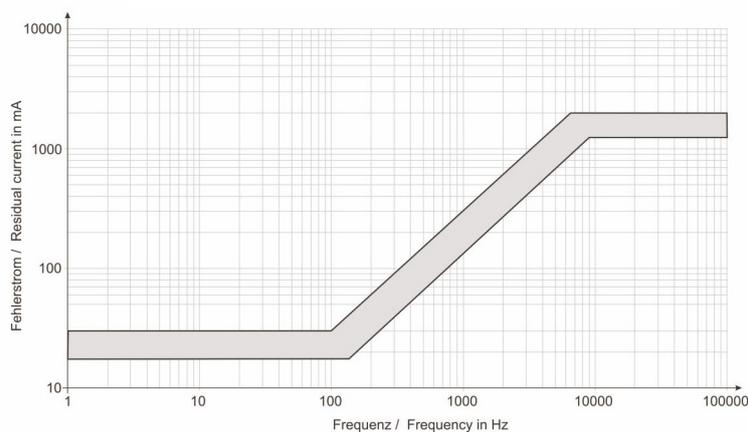


Abbildung 6.18: Typischer Auslösefrequenzgang von allstromsensitiven RCDs; Quelle: Datenblatt „Fehlerstromschutzschalter (Typ B) FID - B“ Firma Schrack

### 6.3.2 Untersuchungen zum Verhalten von RCDs in IT-Netzen

Ein IT-Netz darf im ersten Fehlerfall (Erdschluss/Isolationsfehler) weiterbetrieben werden, so lange die Bedingung (3.8) bzw. (3.9) eingehalten wird [6]. Bei dieser Netzform ist keine Erdung der Stromquelle vorhanden, und somit fließt bei einem Erdschluss nur ein meist geringer kapazitiver Fehlerstrom. Dieser teilt sich jedoch je nach Netztopologie unterschiedlich im Netz auf.

Um das Verhalten von RCDs bei einem Erdschluss im IT-Netz beschreiben zu können, wurden verschiedene Versuche am Laboraufbau durchgeführt. Dabei wurde die Netztopologie/-längen verändert, wie auch der Typ und die Bauart der eingesetzten RCDs (siehe Tab. 6.4).

	Bezeichnung	Auslösefehlerstrom $I_{\Delta N}$ [A]	Typ	Bauart	Polzahl
1	BC002103	0,03	AC	unverzögert	4
2	BC024103	0,03	AC	G	4
3	BC034103	0,03	A	G	4
4	BC052103	0,03	A	unverzögert	4
5	BD874103	0,03	B	G	4
6	BC002110	0,1	AC	unverzögert	4
7	BC024110	0,1	AC	G	4
8	BD874110	0,1	B	G	4
9	BC002130	0,3	AC	unverzögert	4
10	BD874130	0,3	B	G	4

Tabelle 6.4: Liste der verwendeten Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen der Firma Schrack

### 6.3.2.1 Verhalten von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs) bei unterschiedlicher Netzgröße

Mit den nachfolgenden Messungen wird untersucht, ab welcher Netzgröße bei einem Erdschluss der kapazitive Fehlerstrom ausreicht, um unterschiedliche RCDs auszulösen.

- Messung 1

Bei der Netzkonfiguration, die in Abb. 6.19 ersichtlich ist, ergibt sich das in Tab. 6.5 angegebene Auslöseverhalten der einzelnen RCDs. Dabei sind die einzelnen Labormodule wie in Abb. 4.4 dargestellt aufgebaut. Die Erdkapazitäten in Abb. 6.19 sind als konzentrierte Elemente dargestellt, d.h. die zwei Erdkapazitäten am Leitungsende und -anfang des  $\pi$ -Ersatzschaltbildes (siehe Abb. 4.1) wurden zu einer zusammengefasst. D.h. alle nachfolgenden Bilder sind nur eine Prinzipsdarstellung vom Messaufbau im Labor.

Bei dieser Netzkonfiguration (siehe Abb. 6.19) ist die Differenz der zu- und abfließenden Ströme auf L1, L2, L3 und dem N-Leiter immer zu klein, um die RCD zu einer sofortigen Auslösung zu bringen. Erst wenn das Isolationsüberwachungsgerät IRDH575 der Firma Bender die Isolationsfehlersuche startet und ein Prüfstrom des IRDH von 25 oder 50 mA gewählt wird, kann dies zu einem Ansprechen führen, da die RCD im Bereich von 50 - 100 % des  $I_{\Delta N}$  auslösen kann (siehe Kap. 6.3.1).

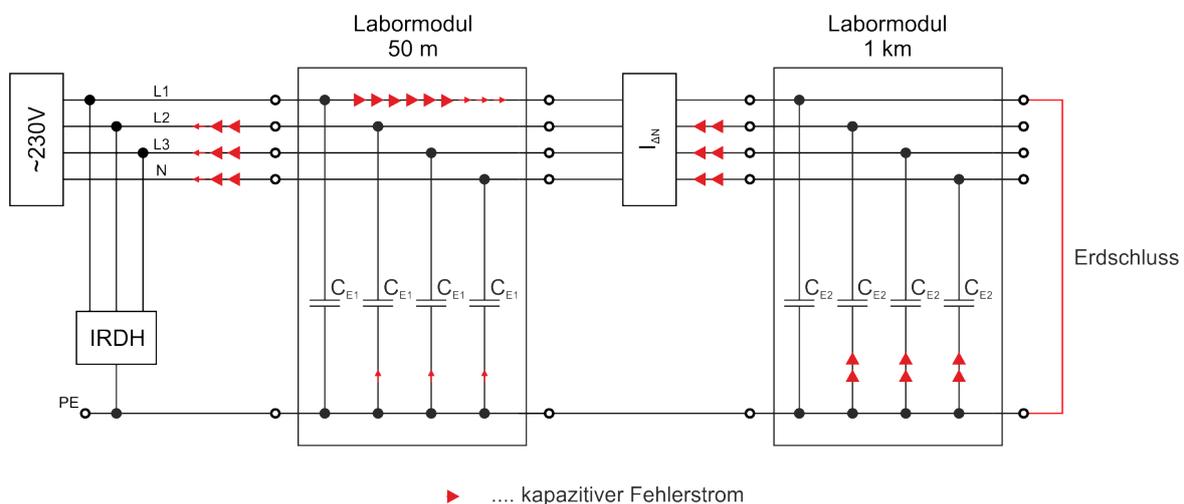


Abbildung 6.19: Stromfluss bei Erdschluss der Messung 1

Wie auch die Ergebnisse bei Messung 3, 7 und 8 zeigen, reagiert der verzögerte Typ AC, Bauart G nicht auf den Prüfstrom des IRDH. Somit kommt es auch bei einem Prüfstrom von

50 mA zu keiner Auslösung der RCD mit einem  $I_{\Delta N}$  von 0,03 A (siehe Tab. 6.5: Messung C1). Nur die unverzögerten Typen AC und A lösen aus, wenn der Prüfstrom des IRDH größer ist als der Auslösenennfehlerstrom (Messung B1 und F1).

Messung	RCD	$I_{\Delta N}$ [A]	IRDH Prüfstrom [A]	Auslösung RCD
A1	BC002103	0,03	0,025	keine
B1	BC002103	0,03	0,05	ja*
C1	BC024103	0,03	0,05	keine
D1	BC034103	0,03	0,05	keine
E1	BC052103	0,03	0,025	keine
F1	BC052103	0,03	0,05	ja*
G1	BD874103	0,03	0,025	ja*
H1	BD874103	0,03	0,05	ja*
I1	BC002110	0,1	0,05	keine
J1	BD874110	0,1	0,05	keine

\*Auslösung der RCD durch zu hohen Prüfstrom des IRDH

Tabelle 6.5: Auslöseverhalten der RCDs bei Messung 1

Erst ein allstromsensitiver Typ (Typ B) reagiert auch auf einen niedrigeren Prüfstrom des IRDH. Beträgt dieser 25 oder 50 mA, genügt das, um diese RCD auszulösen (Messung G1 und H1). Bei einem  $I_{\Delta N} = 0,1$  A genügt auch der größtmögliche Prüfstrom von 50 mA nicht mehr, um die RCD auszulösen (Messung I1 und J1).

• Messung 2

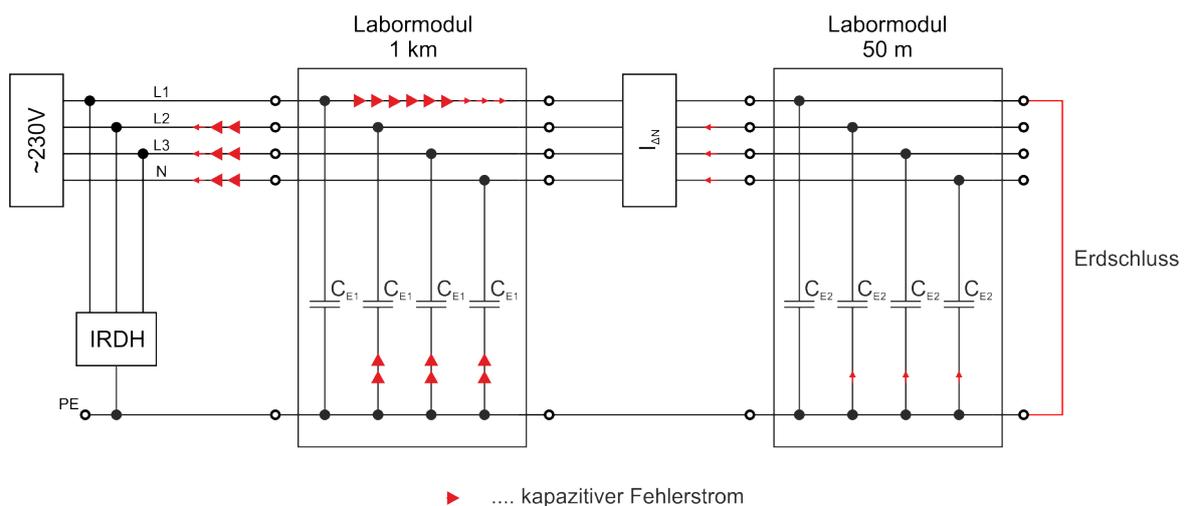


Abbildung 6.20: Stromfluss bei Erdschluss der Messung 2

Im Gegensatz zum Netzaufbau in Messung 1 befindet sich das kurze Leitungsstück vor der RCD (siehe Abb. 6.20). In dieser Abbildung ist ersichtlich, dass die Differenz aus zu- und abfließenden Strömen auf den von der RCD überwachten Phasen wesentlich größer ist als bei Messung 1. Der kapazitive Fehlerstrom  $I_{CE}$  am Laboraufbau beträgt bei 1 km Netzlänge 38 mA (siehe Tab. 5.3). Damit löst eine RCD mit  $I_{\Delta N} = 0,03$  A bei Eintritt eines Erdschlusses sofort aus (siehe Tab. 6.6: Messung A2 bis D2).

Messung	RCD	$I_{\Delta N}$ [A]	IRDH Prüfstrom [A]	Auslösung RCD
A2	BC002103	0,03	0,05	sofort
B2	BC024103	0,03	0,05	sofort
C2	BC034103	0,03	0,05	sofort
D2	BD874103	0,03	0,05	sofort
E2	BC002110	0,1	0,05	keine
F2	BC024110	0,1	0,05	keine
G2	BD874110	0,1	0,025	keine
H2	BD874110	0,1	0,05	ja*

\*Auslösung der RCD durch zu hohen Prüfstrom des IRDH

Tabelle 6.6: Auslöseverhalten der RCDs bei Messung 2

Beträgt  $I_{\Delta N}$  aber 0,1 A, so ist die Differenz auf den überwachten Phasen zu klein, um die RCD zu einer sofortigen Auslösung zu bringen. Jedoch kann der kapazitive Fehlerstrom plus dem Prüfstrom des IRDH mit 50 mA die RCD auslösen, da hier für die Dauer des Prüfstromimpulses von 2 s eine Differenz von etwa 85 mA erreicht wird und somit im Bereich von  $0,5 - 1 \cdot I_{\Delta N}$  liegt. Wie schon bei Messung 1 angemerkt, reagiert der Typ AC, Bauart G nicht auf den Prüfstrom des IRDH (Messung F2). Auch für den unverzögerten Typ AC reicht diese Differenz nicht für eine Auslösung aus (Messung E2).

Somit kommt es erst wieder bei einer RCD vom Typ B zu einer Auslösung, durch  $I_{CE}$  plus den 50 mA des Prüfstroms des IRDH (Messung H2). Beträgt der Prüfstrom nur 25 mA, führt dies zu keinem Ansprechen, da die Differenz zu klein ist (Messung G2).

- Messung 3

Im Vergleich zum Messaufbau der Messung 1 wurde hinter der RCD noch ein Labormodul, welches eine Länge von 100 m simuliert, eingefügt. Dadurch löst, im Gegensatz zur Messung

A1 (siehe Tab. 6.5), auch eine unverzögerte RCD mit einem Auslösenennfehlerstrom von 0,03 A schon bei einem Prüfstrom des IRDH von 25 mA aus (Messung A3).

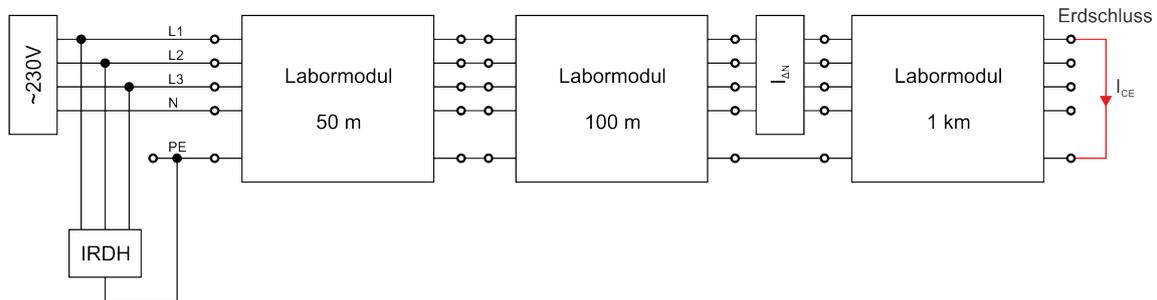


Abbildung 6.21: Laboraufbau bei Messung 3

Das ist auf die vergrößerte Netzlänge hinter der RCD zurückzuführen. Dennoch reichen die 25 mA Prüfstrom des IRDH nicht aus, um eine unverzögerte pulststromsensitive RCD mit  $I_{\Delta N} = 0,03 \text{ A}$  (Typ A) auszulösen (Messung G3). Zusätzlich kommt es auch bei einem Typ A, Bauart G zur Auslösung bei einem Prüfstrom von 50 mA (siehe Messung F3).

Messung	RCD	$I_{\Delta N}$ [A]	IRDH Prüfstrom [A]	Auslösung RCD
A3	BC002103	0,03	0,025	ja*
B3	BC002103	0,03	0,05	ja*
C3	BC024103	0,03	0,025	keine
D3	BC024103	0,03	0,05	keine
E3	BC034103	0,03	0,025	keine
F3	BC034103	0,03	0,05	ja*
G3	BC052103	0,03	0,025	keine
H3	BC052103	0,03	0,05	ja*
I3	BD874103	0,03	0,025	ja*
J3	BD874103	0,03	0,05	ja*

\*Auslösung der RCD durch zu hohen Prüfstrom des IRDH

Tabelle 6.7: Auslöseverhalten der RCDs bei Messung 3

- Messung 4

Bei dieser Messung wird die Netzlänge hinter der RCD weiter vergrößert (siehe Abb. 6.22). Damit reicht die Differenz aus zu- und abfließenden Strömen auf den von der RCD überwachten Phasen aus, um eine RCD mit  $I_{\Delta N} = 0,1 \text{ A}$  sofort auszulösen (siehe Tab. 6.8: Messung A4 - C4). Obwohl der  $I_{CE}$  nur ca. 80 mA beträgt, reicht dies für eine Auslösung der RCD aus, da dieser im Bereich von 50 - 100 % von  $I_{\Delta N}$  liegt.

Erst eine RCD mit einem Auslösenennfehlerstrom von 0,3 A, spricht bei dieser Netzkonfiguration nicht an (Messung D4).

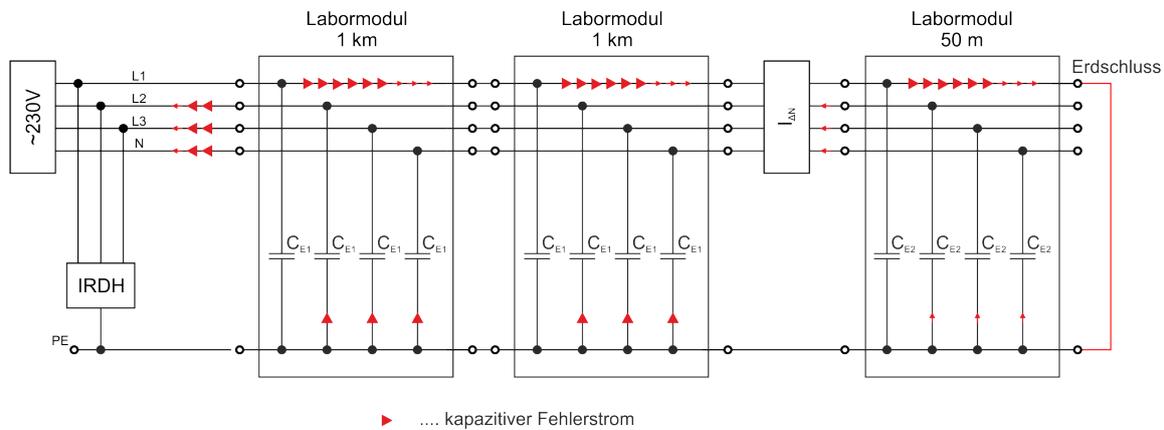


Abbildung 6.22: Stromfluss bei Erdschluss der Messung 4

Messung	RCD	$I_{\Delta N}$ [A]	IRDH Prüfstrom [A]	Auslösung RCD
A4	BC002110	0,1	0,05	sofort
B4	BC024110	0,1	0,05	sofort
C4	BD874110	0,1	0,05	sofort
D4	BC002130	0,3	0,05	keine

Tabelle 6.8: Auslöseverhalten der RCDs bei Messung 4

- Messung 5

Bei dem Laboraufbau wie in Abb. 6.23 löst auch eine RCD mit einem Auslösenennfehlerstrom von 0,3 A sofort aus (siehe Tab. 6.9). Wiederum genügt hier ein kapazitiver Fehlerstrom kleiner als  $I_{\Delta N}$ , bei dieser Anordnung wurden 238 mA gemessen, um ein sofortiges Ansprechen der RCDs hervorzurufen.

Beträgt hingegen die Leitungslänge hinter der Fehlerstrom-Schutzeinrichtung nur 5 km, löst keine der beiden RCDs aus.

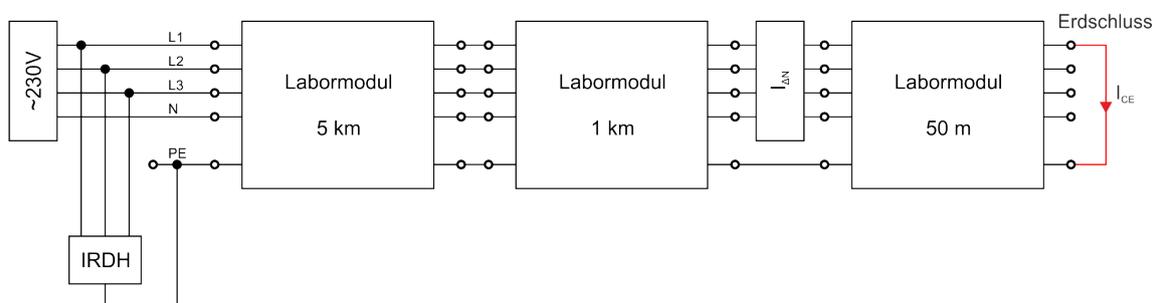


Abbildung 6.23: Laboraufbau bei Messung 5

Messung	RCD	$I_{\Delta N}$ [A]	IRDH Prüfstrom [A]	Auslösung RCD
A5	BC002130	0,3	0,05	sofort
B5	BD874130	0,3	0,05	sofort

Tabelle 6.9: Auslöseverhalten der RCDs bei Messung 5

### 6.3.2.2 Verhalten von RCDs bei unterschiedlicher Netztopologie

Bei diesen Untersuchungen wird festgestellt, wie sich unterschiedliche Netztopologien auf das Auslöseverhalten von RCDs auswirken.

- Messung 6

Bei diesen Untersuchungen besteht das Netz aus einer Hauptverteilung mit insgesamt 1,05 km Länge und einem Abgang mit 100 m, der von einer RCD überwacht wird. Hier wird zwischen einem Erdschluss am Ort A (siehe Abb. 6.24) und einem Erdschluss am Ort B (siehe Abb. 6.25) unterschieden. Der kapazitive Fehlerstrom  $I_{CE}$  am Laboraufbau beträgt bei 1 km Netzlänge 38 mA (siehe Tab. 5.3).

Wie in Abb. 6.24 dargestellt, fließt bei einem Erdschluss am Ort A nur ein geringer kapazitiver Strom über die Phasen L2, L3 und N des Abgangs. Dadurch löst keine der RCDs mit einem Auslösenennfehlerstrom von 0,03 A aus (siehe Tab. 6.10).

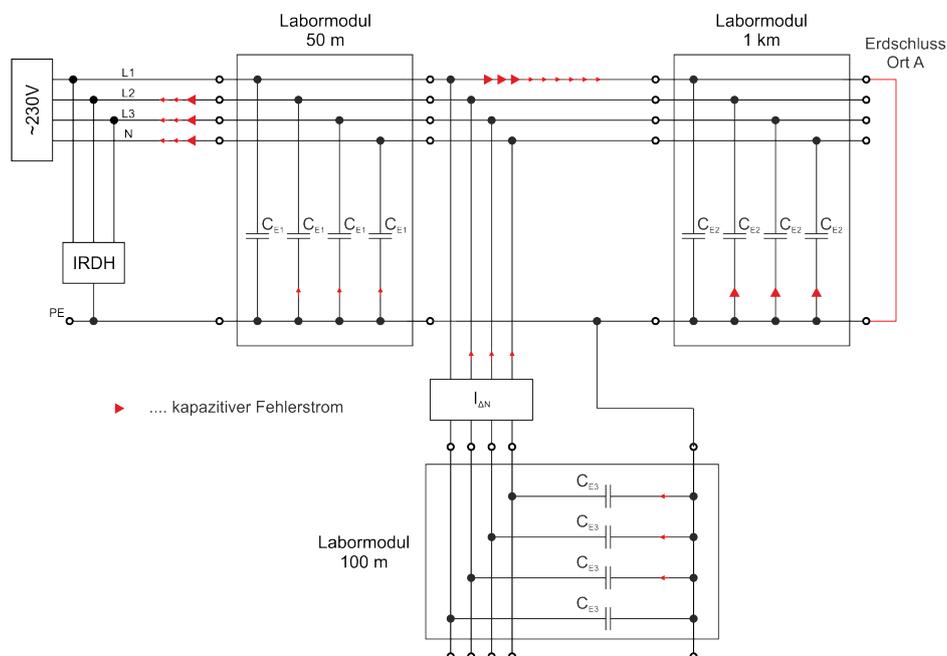


Abbildung 6.24: Stromfluss bei Erdschluss (Ort A) der Messung 6

Erst bei einem Erdschluss am Ort B (siehe Abb. 6.25), kann eine große Differenz der zu- und abfließenden Ströme auf den überwachten Phasen der RCD festgestellt werden.

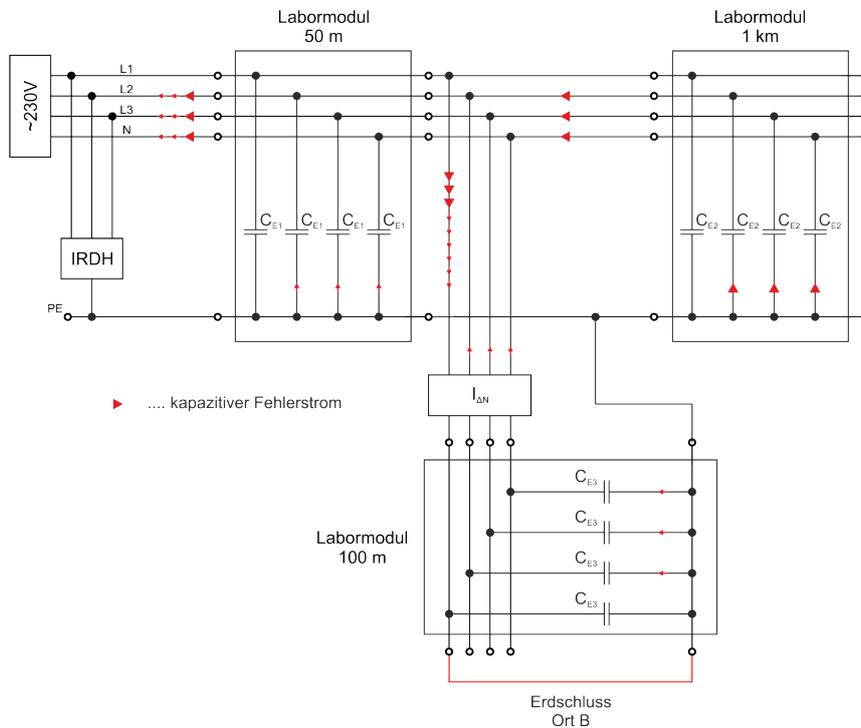


Abbildung 6.25: Stromfluss bei Erdschluss (Ort B) der Messung 6

Dieser große Differenzstrom führt zu einer sofortigen Auslösung von allen RCDs (siehe Tab. 6.10).

Messung	RCD	$I_{\Delta N}$ [A]	IRDH Prüfstrom [A]	Erdschluss	Auslösung RCD
A6	BC002103	0,03	0,05	Ort A	keine
B6	BC002103	0,03	0,05	Ort B	sofort
C6	BC024103	0,03	0,05	Ort A	keine
D6	BC024103	0,03	0,05	Ort B	sofort
E6	BC034103	0,03	0,05	Ort A	keine
F6	BC034103	0,03	0,05	Ort B	sofort
G6	BD874103	0,03	0,05	Ort A	keine
H6	BD874103	0,03	0,05	Ort B	sofort

Tabelle 6.10: Auslöseverhalten der RCDs bei Messung 6

- Messung 7

Im Gegensatz zu Messung 6 (siehe Abb. 6.24) wurden die Labormodule für 100 m und für 1 km getauscht (siehe Abb. 6.26).

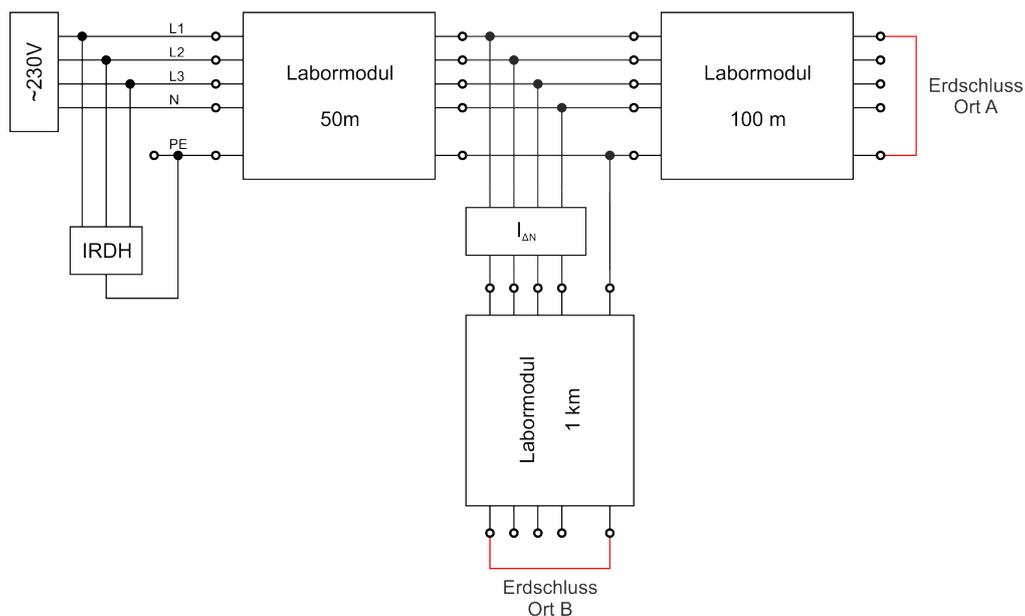


Abbildung 6.26: Laboraufbau bei Messung 7

Ein Erdschluss am Ort A führt damit zu einer sofortigen Auslösung einer Fehlerstrom-Schutzeinrichtung mit  $I_{\Delta N} = 0,03 \text{ A}$  (siehe Tab. 6.11). Bei einem Erdschluss am Ort B, kann es zu einer Auslösung der jeweiligen RCDs kommen, wenn der Prüfstrom des IRDH zu hoch ist (Messung B7, C7, I7, K7 und L7). Warum es bei einem zu hoch gewählten Prüfstrom des IRDH zu einer Auslösung der verschiedenen RCDs kommt, wird bei der nachfolgenden Messung 8 näher erläutert.

Messung	RCD	$I_{\Delta N} \text{ [A]}$	IRDH Prüfstrom [A]	Erdschluss	Auslösung RCD
A7	BC002103	0,03	0,05	Ort A	sofort
B7	BC002103	0,03	0,025	Ort B	ja*
C7	BC002103	0,03	0,05	Ort B	ja*
D7	BC024103	0,03	0,05	Ort A	sofort
E7	BC024103	0,03	0,025	Ort B	keine
F7	BC024103	0,03	0,05	Ort B	keine
G7	BC034103	0,03	0,05	Ort A	sofort
H7	BC034103	0,03	0,025	Ort B	keine
I7	BC034103	0,03	0,05	Ort B	ja*
J7	BD874103	0,03	0,05	Ort A	sofort
K7	BD874103	0,03	0,025	Ort B	ja*
L7	BD874103	0,03	0,05	Ort B	ja*

\*Auslösung der RCD durch zu hohen Prüfstrom des IRDH

Tabelle 6.11: Auslöseverhalten der RCDs bei Messung 7

Die Messungen 6 und 7 haben gezeigt, dass eine RCD, die einen Abzweig überwacht, folgendes Verhalten aufweist:

1. Bei einem Erdschluss an der Hauptverteilung (Erdschluss Ort A) löst eine RCD sofort aus, wenn durch die Ausdehnung des Abgangs die Bedingung  $I_{CE} (\text{Abgang}) \geq I_{\Delta N}$  erfüllt ist.
2. Ist hingegen ein Erdschluss am Abgang (Erdschluss Ort B) vorhanden, löst die RCD des Abgangs sofort aus, wenn durch die Ausdehnung der Hauptverteilung die Bedingung  $I_{CE} (\text{Hauptverteilung}) \geq I_{\Delta N}$  erfüllt ist.

Wie aber schon die Messungen A4, B4, C4 und 5 gezeigt haben, können auch kleinere kapazitive Fehlerströme, die im Bereich von  $0,5 - 1 \cdot I_{\Delta N}$  der RCD liegen, eine sofortige Auslösung bewirken.

- Messung 8

Bei diesem Laboraufbau reicht die Länge der Hauptverteilung oder des Abgangs nicht aus, um bei einem Erdschluss einen ausreichend hohen kapazitiver Fehlerstrom zu erhalten, der die RCD sofort auslöst. Dies gilt für einen Erdschluss sowohl an Ort A, als auch an Ort B (siehe Abb. 6.27 und 6.28). Daher wird durch Messung 8 nur das Verhalten von RCDs bei zu hoch gewähltem Prüfstrom des IRDH gezeigt.

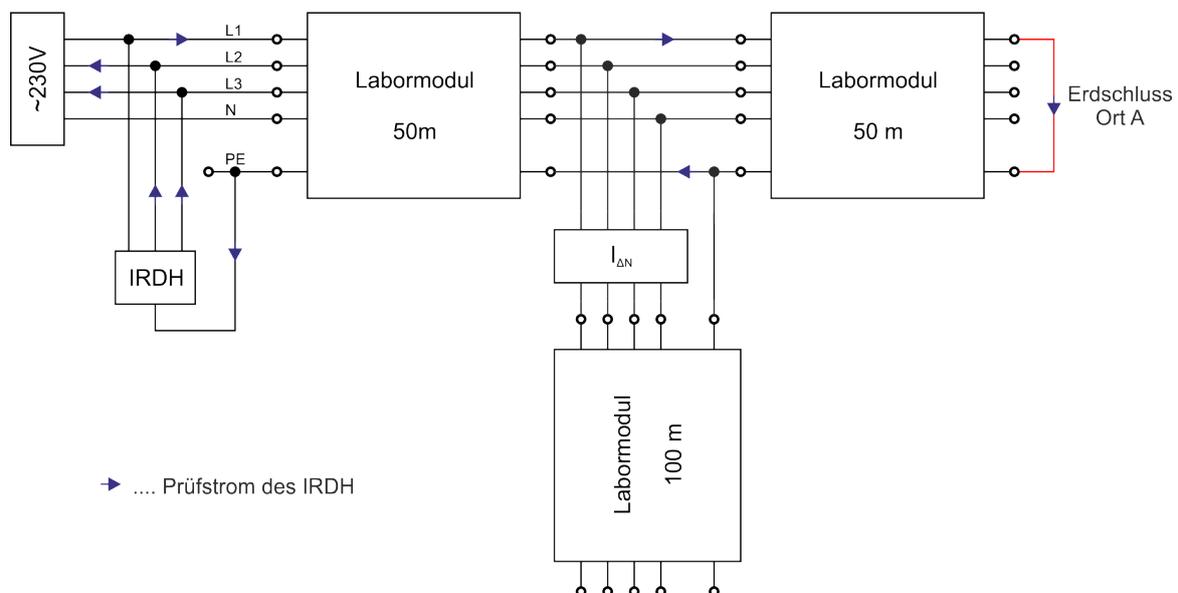


Abbildung 6.27: Prüfstromfluss bei Erdschluss (Ort A) der Messung 8

Bei einem Erdschluss am Ort A fließt der Prüfstrom des IRDH nicht über die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (siehe Abb. 6.27). Dadurch kann auch bei zu hohem Prüfstrom die RCD durch diesen nicht ausgelöst werden (siehe Tab. 6.13). Erst bei einem Erdschluss am Ort B fließt der Prüfstrom des IRDH über eine Phase, die von der RCD überwacht wird. Ist der Prüfstrom zu hoch, reicht diese Differenz aus, um die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung zur Auslösung zu bringen (Messung C8). Ein allstromsensitiver Typ löst auch schon bei einem Prüfstrom des IRDH von 25 mA aus (Messung K8 und L8).

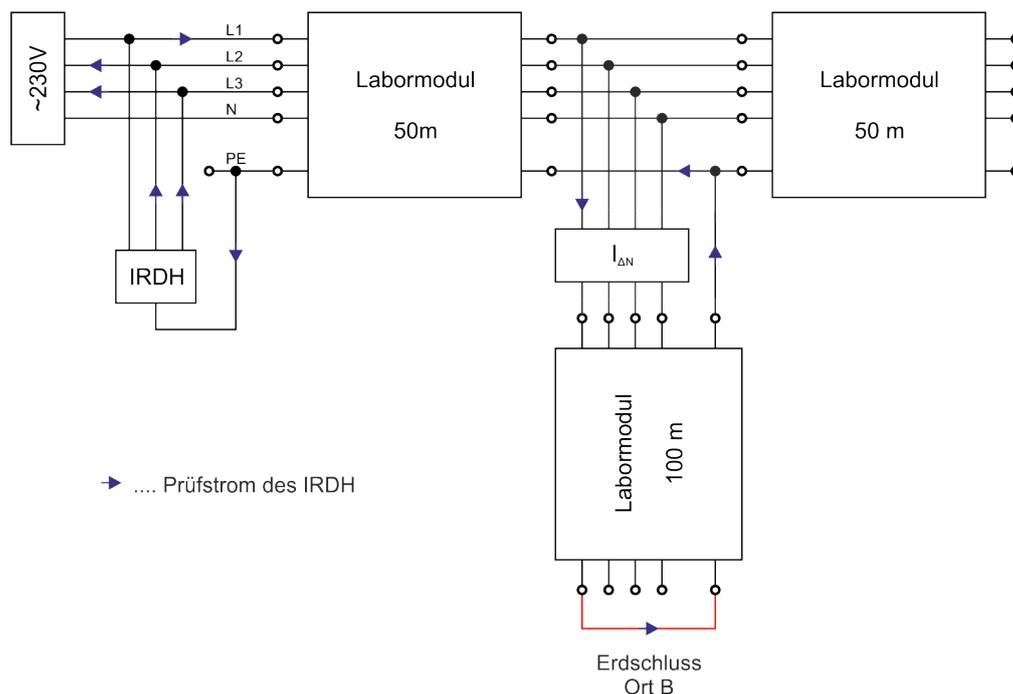


Abbildung 6.28: Prüfstromfluss bei Erdschluss (Ort B) der Messung 8

Wie bei den vorherigen Messungen bereits gezeigt wurde, reagiert der Typ AC, Bauart G nicht auf den Prüfstrom des IRDH und löst auch nicht bei einem Prüfstrom von 50 mA aus (Messung E8 und F8). Wird jedoch wie bei Messung 7 die Länge des durch die RCD überwachten Abgangs auf 1 km erweitert, führt dies dazu, dass auch der unverzögerte Typ AC schon bei einem Prüfstrom des IRDH von 25 mA auslöst, sowie der Typ A, Bauart G bei 50 mA (siehe Tab. 6.11: Messung B7 und I7).

Somit kann bei einer Vergrößerung eines Netzes der Fall eintreten, dass die RCD nicht sofort bei einem Erdschluss anspricht. Im Zusammenspiel mit einem zu hoch gewählten Prüfstrom des IRDH kann es dennoch zu einer Fehlauflösung kommen.

Messung	RCD	$I_{\Delta N}$ [A]	IRDH Prüfstrom [A]	Erdschluss	Auslösung RCD
A8	BC002103	0,03	0,05	Ort A	keine
B8	BC002103	0,03	0,025	Ort B	keine
C8	BC002103	0,03	0,05	Ort B	ja*
D8	BC024103	0,03	0,05	Ort A	keine
E8	BC024103	0,03	0,025	Ort B	keine
F8	BC024103	0,03	0,05	Ort B	keine
G8	BC034103	0,03	0,05	Ort A	keine
H8	BC034103	0,03	0,025	Ort B	keine
I8	BC034103	0,03	0,05	Ort B	keine
J8	BC052103	0,03	0,05	Ort A	keine
K8	BC052103	0,03	0,025	Ort B	keine
L8	BC052103	0,03	0,05	Ort B	ja*
M8	BD874103	0,03	0,05	Ort A	keine
N8	BD874103	0,03	0,025	Ort B	ja*
O8	BD874103	0,03	0,05	Ort B	ja*

\*Auslösung der RCD durch zu hohen Prüfstrom des IRDH

Tabelle 6.12: Auslöseverhalten der RCD bei Messung 8

### 6.3.2.3 Verhalten von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen bei unterschiedlicher Anordnung IRDH zu RCD

Durch diese Messung wird veranschaulicht, wie sich der Einbauort der RCD im Vergleich zum Isolationsüberwachungsgerät IRDH auf dessen Verhalten auswirkt. Genauer gesagt also wie sich ein zu hoher Prüfstrom des IRDH auswirkt, wenn die RCD einmal vor/nach dem IRDH eingebaut wird.

- Messung 9

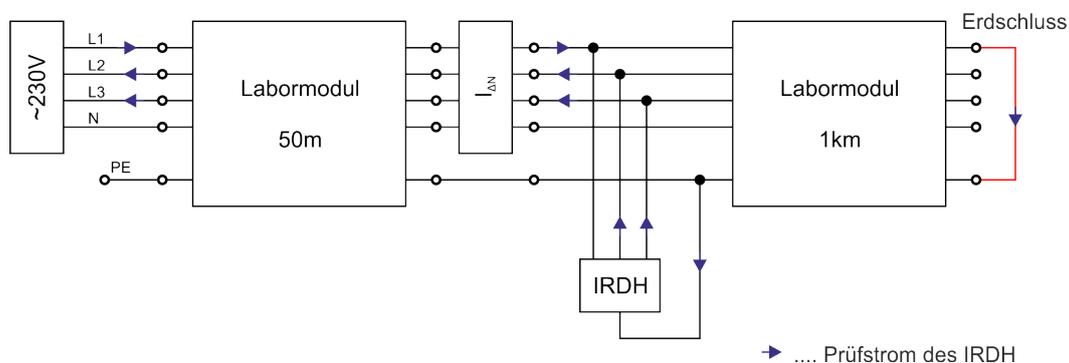


Abbildung 6.29: Laboraufbau bei Messung 9

Bei einer Anordnung wie in Abb. 6.19 wurde bei den Messungen B1, F1, G1 und H1 festgestellt, dass ein zu hoher Prüfstrom des IRDH ausreicht, damit die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung auslöst. Wird hingegen das IRDH wie in Abb. 6.29 ersichtlich nach der RCD platziert, ergibt sich ein Auslöseverhalten, wie es in Tab. 6.13 angegeben ist.

Messung	RCD	$I_{\Delta N}$ [A]	IRDH Prüfstrom [A]	Auslösung RCD
A9	BC002103	0,03	0,05	keine
B9	BD874103	0,03	0,05	keine

Tabelle 6.13: Auslöseverhalten der RCDs bei Messung 9

In diesem Fall heben sich die zu- und abfließenden Anteile des Prüfstroms des IRDH auf den überwachten Phasen von der RCD auf. Somit kommt es bei einer solchen Konfiguration von RCD zu IRDH auch bei zu hohem Prüfstrom zu keiner Auslösung (Messung A9 und B9).

### 6.3.3 Erkenntnisse

Bei Einsatz einer RCD in einem IT-Netz muss darauf geachtet werden, dass diese beim ersten Fehlerfall (Erdschluss/Isolationsfehler) nicht auslöst, um die hohe Verfügbarkeit in diesen Systemen sicherstellen zu können. Wie bei den Messungen gezeigt wurde, führen die kapazitiven Fehlerströme bei größeren IT-Netzen zu einer Auslösung der RCD. Auch ein zu hoher Prüfstrom des IRDH genügt bereits, um eine Auslösung der Fehlerstrom-Schutzeinrichtung zu bewirken. Somit würde der große Vorteil der hohen Verfügbarkeit bei isoliert betriebenen Netzen verloren gehen.

Um die hohe Verfügbarkeit beim Einsatz von RCD in IT-Netzen zu gewährleisten, müssen deswegen mehrere Aspekte beachtet werden. Es muss individuell für jedes IT-Netz ein passendes Konzept erstellt werden, damit bei der jeweiligen Netztopologie die unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich der richtigen Länge der Hauptverteilung und Abgänge, dem Einbauort und Art der Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen eingehalten werden können. Bei Verwendung eines IRDH der Firma Bender als IÜW muss zusätzlich auf die Höhe des einstellbaren Prüfstromes, der für die Erdschlussortung verwendet wird, geachtet werden.

## 7 Prüfung von elektrischen Anlagen

Prüfen bezeichnet „alle Tätigkeiten, durch welche festgestellt wird, ob die Ausführung der gesamten elektrischen Anlage den jeweils zutreffenden Bestimmungen entspricht. Prüfen umfasst das Besichtigen, Erproben und Messen“ [25].

In diesem Kapitel wird auf den Nachweis über die Wirksamkeit des Fehlerschutzes „Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung“ in IT-Netzen eingegangen, wobei diese im ersten Fehlerfall weiterbetrieben werden dürfen. Dabei werden die geforderten Nachweisbedingungen in der österreichischen und der deutschen Norm gegenübergestellt.

### 7.1 ÖVE/ÖNORM E8001, Teil 6-61: Prüfungen - Erstprüfungen (2001)

Am Beginn steht laut ÖVE/ÖNORM E8001, Teil 6-61 die Überprüfung der richtigen Einstellung und Funktion des Isolationsüberwachungsgerätes. Danach muss für Isolationsüberwachungssysteme eine Berechnung oder Messung des Fehlerstromes beim ersten Fehler erfolgen. Die Messung muss dabei nur durchgeführt werden, wenn eine Berechnung wegen unbekannter Parameter nicht möglich ist. Diese Messung kann auch entfallen, wenn das System über eine hochohmige Impedanz mit Erde verbunden ist und alle Körper der Anlage mit dieser Erde verbunden sind (entspricht dem Potenzialausgleich).

In der Norm werden keine konkreten Werte oder Bedingungen gefordert, die der Fehlerstrom zum Nachweis der Wirksamkeit der Schutzmaßnahme einhalten muss. Es wird davon ausgegangen, dass durch die nicht zu große Ausdehnung von isolierten Netzen der Fehlerstrom so gering ist, dass bei einem ersten Körper- oder Erdschluss nicht ausgeschaltet werden muss [5].

Im Falle eines zweiten Fehlers muss nach der Art der Erdung der Körper der Betriebsmittel unterschieden werden.

Wenn die Körper in Gruppen oder einzeln geerdet sind, gelten die Bedingungen wie im TT-System (Schutzerdung bzw. Fehlerstrom-Schutzschaltung). Deshalb muss der Nachweis der Bedingungen in Kap. 3.3 erbracht werden. Dies erfolgt durch:

1. Widerstandsmessung des Erders der Körper in der Anlage bzw. Messung der Fehlerspannung und rechnerischer Nachweis dass  $R_A \leq 100 \Omega$  ist.
2. Nachweis der Charakteristik der zugehörigen Schutzeinrichtung (RCD, Überstrom-Schutzeinrichtung oder Schutzerdungsleiter)

Sind die Körper über einen Schutzleiter gemeinsam geerdet, gelten die Forderungen wie im TN-System (Nullung). Das bedeutet, dass der Nachweis der Bedingungen in Kap. 3.4 erbracht werden muss. Diese werden wie folgt nachgewiesen:

1. Messung der Fehlerschleifenimpedanz
2. Nachweis der Charakteristik der zugehörigen Schutzeinrichtung (Leistungsschalter, Sicherungen oder RCD)

*„Zusätzlich muss, wo erforderlich, der wirksame Erdungswiderstand  $R_B$  in Übereinstimmung mit ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2000-03, Abschnitt 14 ermittelt werden.“ [25]*

Als Anhang sind in dieser Norm noch einige Methoden zur Widerstandsmessung z.B. der Erder oder Fehlerschleifenimpedanz enthalten.

## 7.2 DIN VDE 0100-600 Teil 6: Prüfungen (2008)

Als erstes soll laut DIN VDE 0100-600, Teil 6 die Funktion des IÜW durch Betätigen der Prüfeinrichtung erprobt werden. Im Gegensatz zur österreichischen Norm stellt die deutsche Norm konkrete Forderungen, welche hinsichtlich der Wirksamkeit des Fehlerschutzes im ersten Fehlerfall eingehalten werden müssen. Es wird gefordert, dass bei Auftreten eines Fehlers im Außen- oder Neutralleiter die Bedingung (3.8) bzw. (3.9) durch Berechnung oder Messung des Fehlerstromes  $I_d$  nachgewiesen wird. Wiederum wird die Messung erst dann gefordert, wenn eine Berechnung von  $I_d$  durch unbekannte Parameter nicht möglich ist.

Darüber hinaus werden zwei Methoden beschrieben wie diese Messung erfolgen kann:

- *„Der Erdungswiderstand  $R_A$  wird nach 61.3.6.2 (siehe [28]) gemessen und nach Erdung eines Außenleiters an der Stromquelle wird der Ableitstrom  $I_d$  des Netzes gemessen,*

wobei das Produkt  $R_A \cdot I_d$  den Grenzwert der dauernd zulässigen Berührungsspannung  $U_L$  nicht überschreiten darf.“ [28]

- „Der Spannungsabfall am Erdungswiderstand  $R_A$  wird nach Erdung eines Außenleiters an der Stromquelle gemessen, wobei dieser kleiner sein muss als die zulässige Berührungsspannung  $U_L$ .“ [28]

Im zweiten Fehlerfall muss wiederum nach der Erdung der Körper unterschieden werden. Sind die Körper wie in einem TT-System geerdet (einzeln oder in Gruppen) muss der Nachweis der Bedingungen nach DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06, 411.5.3 (auf S.17) erbracht werden. Dies wird wie folgt sichergestellt:

1. Widerstandsmessung von  $R_A$  (der Erder für die Körper der Anlage)
2. Prüfung der Kenndaten und/oder der Wirksamkeit der zugeordneten Schutzeinrichtung (Überstrom-Schutzeinrichtungen oder RCDs)

Bei Erdung der Körper wie im TN-System (gemeinsame Erdung) muss die Einhaltung der Bedingungen nach DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06, 411.4.4 und 411.3.3 nachgewiesen werden durch:

1. Messung der Fehlerschleifenimpedanz
2. Prüfung der Kenndaten und/oder der Wirksamkeit der zugeordneten Schutzeinrichtung (Überstrom-Schutzeinrichtungen oder RCDs)

Auch bei dieser Norm sind verschiedenen Messmethoden, die zur Ermittlung des Widerstandes der Erder oder Fehlerschleifenimpedanz dienen, enthalten.

Bei all diesen Messungen zur Prüfung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen beim ersten Fehler muss ein künstlicher Erdschluss hergestellt werden. Dabei muss beachtet werden, dass es dadurch zu einer höheren Isolationsbeanspruchung kommt. Darüber hinaus sollten auch Vorkehrungen getroffen werden, damit einerseits bei einem eventuell auftretenden zweiten Erdschluss keine Gefährdung für Menschen besteht, andererseits aber auch eine Beschädigung von Sachen/Geräten verhindert werden kann.

Zusätzlich wird in dieser Norm angemerkt, dass bei der Erprobung der Isolationsüberwachungseinrichtung der Widerstand, der zwischen einem Außen- und Schutzleiter zu schalten ist, mindestens  $2 \text{ k}\Omega$  betragen soll. Dieser soll aber andererseits auch kleiner als der in der



Isolationsüberwachungseinrichtung eingestellte Wert sein. Üblicherweise werden  $100 \Omega/V$  der Netznennspannung als Ansprechwert bei der Isolationsüberwachungseinrichtung eingestellt.

## 8 Diskussion

Es gibt nur wenig Literatur, die sich mit dem Thema Niederspannungsnetze mit isoliertem Sternpunkt beschäftigt. Deswegen werden für diese Diplomarbeit die Grundlagen zu IT-Netzen aus den österreichischen und deutschen Normen sowie dem Sachbuch „Schutztechnik mit Isolationsüberwachung“ von Wolfgang Hofheinz erarbeitet. Bei Vergleich der österreichischen zu der deutschen Norm wird festgestellt, dass die österreichischen Normen teilweise nur sehr allgemein gehalten sind und oft keine konkreten Angaben bzw. Bedingungen zu verschiedenen Themen aufweisen.

Bei der Thematik „Weiterbetrieb von isolierten Netzen im ersten Fehlerfall (Erdschluss/ Isolationsfehler)“, wird in Österreich davon ausgegangen, dass durch die geringe Ausdehnung von IT-Netzen der Fehlerstrom so klein ist, dass diese im ersten Fehlerfall ohne Probleme weiterbetrieben werden können [3]. In Deutschland werden dafür konkrete Bedingungen definiert: Es dürfen IT-Netze im ersten Fehlerfall weiterbetrieben werden, solange die zulässige Berührungsspannung nicht überschritten wird (siehe Kap. 3.5) [6]. Deswegen erscheint eine Erweiterung der österreichischen Norm „ÖVE/ÖNORM E 8001-1“ zu diesem Thema sehr sinnvoll.

Ein weiteres Themenfeld, bei welchem eine Erweiterung der Normen sinnvoll wäre, ist die Prüfung der Schutzmaßnahmen von isolierten Netzen. Bei näherer Betrachtung der dafür vorgesehenen Normen (siehe Kap. 7) ist ersichtlich, dass hier die Methoden für den Nachweis zur Einhaltung der Bedingungen des Fehlerschutzes im ersten Fehlerfall nur sehr unklar definiert sind. „ÖVE/ÖNORM E 8001-6-61“ fordert die Berechnung oder Messung des Fehlerstromes im ersten Fehlerfall, ohne jedoch eine Obergrenze für diesen zu definieren. Es wird auch darauf verzichtet, auf für diesen Zweck mögliche Messmethoden einzugehen und auf zu erwartende Probleme wie etwa die höhere Isolationsbeanspruchung bei künstlicher Erdung eines Außenleiters hinzuweisen. Somit ist auch hier eine Ergänzung der Norm anzustreben.

Ein weiterer wichtiger Punkt, den besonders Betreiber von großen IT-Netzen beachten müs-

sen, ist die maximal mögliche Ausdehnung dieser Netze. Das Problem ist, wie groß ein IT-Netz maximal werden darf, damit es auch beim ersten Fehlerfall ohne Gefahr weiterbetrieben werden kann. Um Aussagen bezüglich der Netzgröße treffen zu können, muss auch hier wieder auf die in der deutschen Norm „DIN VDE 0100-410“ genannten Bedingungen beim ersten Fehlerfall zurückgegriffen werden (siehe Kap. 3.5). Durch Berechnungen wurde dabei festgestellt, dass - solange der Anlagenerder  $R_A$  bei kleinen Werten liegt - die max. Ausdehnung von 3ph-AC-IT-Netzen mit  $U_N = 230 \text{ V}$  auch bei großen Werten der spezifischen Leiter-Erde-Kapazitäten  $C_E'$  nur schwer erreicht wird (siehe Kap. 5.4).

Jedoch müsste(n) der Erdkapazitätsbelag/die Erdkapazitätsbeläge des zu Grunde liegenden Netzes bekannt sein, um eine genaue Abschätzung über die mögliche maximale Netzgröße machen zu können. Der Erdkapazitätsbelag ist aber in den meisten Fällen nicht bekannt und ist von Netz zu Netz unterschiedlich. Deswegen wäre es für Betreiber von großen isolierten Netzen sinnvoll, den Erdkapazitätsbelag zu ermitteln (siehe Kap. 4.1.1), damit dadurch genaue Aussagen über die maximal mögliche Netzausdehnung getroffen werden können. Somit könnten die Betreiber wirklich sicherstellen, dass keine Gefährdung von Personen im ersten Fehlerfall besteht.

Der große Vorteil von isolierten Netzen ist die hohe Verfügbarkeit und genau deswegen werden sie dort eingesetzt, wo eine hohe Versorgungssicherheit gewünscht ist, z.B. in medizinisch genutzten Räumen, im Bergbau oder diversen Industriebetrieben. Die Messergebnisse am Laboraufbau zum Verhalten von RCDs in isolierten Netzen werfen jedoch die Frage auf, ob der Einsatz dieser als Zusatzschutz sinnvoll ist. In kleinen Netzen, in welchen der Fehlerstrom im ersten Fehlerfall so klein ist, dass durch diesen die Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen nicht auslöst, ist ein Einsatz ohne Bedenken möglich. Wird jedoch die Netzausdehnung größer, kann der Fehlerstrom im ersten Fehlerfall die RCD sofort auslösen (siehe Messung 2 bis 5 in Kap. 6.3.2).

Durch die Messungen wurde auch gezeigt, dass der Fehlerstrom bei entsprechender Netztopologie und -ausdehnung ausreicht, um RCDs von erdschlussfreien Abgängen auszulösen (siehe Abb. 8.1, beide RCDs lösen bei einem Erdschluss wie dargestellt sofort aus).

Das bedeutet, dass ein hinsichtlich des Weiterbetriebs im ersten Fehlerfall unbedenklich hoher Fehlerstrom zu einer Auslösung von RCDs führen kann und somit die Stromversorgung unterbricht.

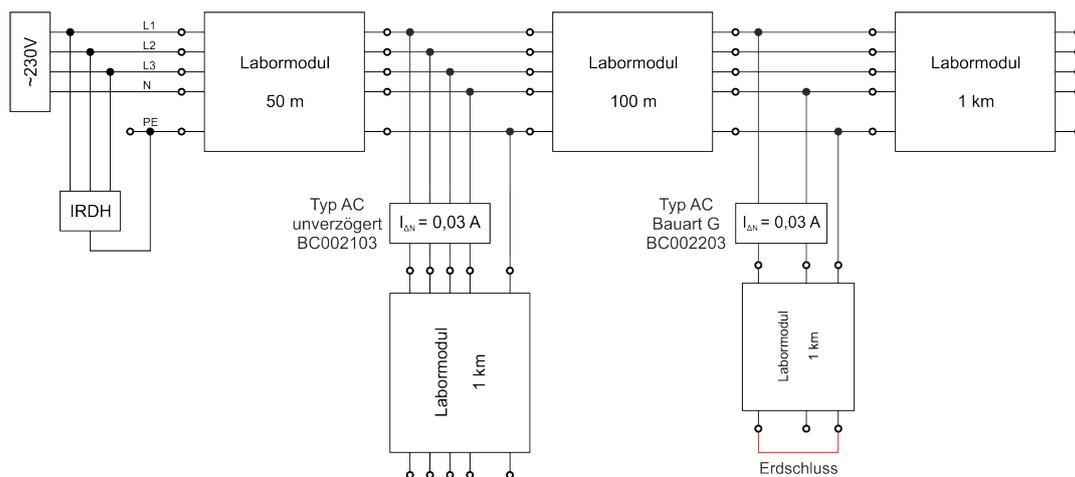


Abbildung 8.1: Messaufbau bei dem auch die RCD am erdschlussfreien Abgang auslöst

Als Zusatzschutz werden von der „ÖVE/ÖNORM E 8001-1“ Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen mit einem  $I_{\Delta N}$  von 0,03 A gefordert. Am Laboraufbau würde somit schon eine Länge von 1 km hinter der Fehlerstrom-Schutzeinrichtung ausreichen, um RCDs mit  $I_{\Delta N} = 0,03$  A im ersten Fehlerfall zur Auslösung zu bringen. Will man also den Vorteil der hohen Verfügbarkeit nicht verlieren, kann ein Einsatz von RCDs in größeren isolierten Netzen nicht empfohlen werden.

# Literaturverzeichnis

Literaturquellen, die in dieser wissenschaftlichen Arbeit nicht zitiert bzw. angeführt wurden dienen zur weiteren Vertiefung in die Materie des Fachbereiches und sind deswegen als weiterführende Literatur zu verstehen.

- [1] DIN IEC/TS 60479-1 VDE V 0140-479-1, „*Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere Teil 1: Allgemeine Aspekte*“, Mai 2007
- [2] DI R. Hirtler, Symposium „*Wirkungen der Elektrizität beim Menschen*“, März 2009
- [3] ÖVE-EN 1, Teil 1, „*Errichtung von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V Teil 1: Begriffe und Schutz gegen gefährliche Körperströme (Schutzmaßnahmen)*“, 1989
- [4] ÖVE-EN 1, Teil 4, „*Errichtung von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V Teil 4: Besondere Anlagen § 53 Ersatzstromversorgungsanlagen und andere Stromversorgungsanlagen für den vorübergehenden Betrieb*“, 1988
- [5] ÖVE/ÖNORM E 8001-1, „*Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen)*“, März 2010
- [6] DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410), „*Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4-41: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag*“, Juni 2007
- [7] Wolfgang Hofheinz: „*Schutztechnik mit Isolationsüberwachung*“, 1.Auflage, VDE-Verlag, 2003, 3-8007-2750-1
- [8] K. H. Paul, „*Technologien und Methoden der konstanten Isolationsüberwachung*“, Sonderdruck aus *Elektropraktiker* Ausgabe 2+3, 2005
- [9] ABB: „*Schaltanlagen-Handbuch*“, Cornelsen Verlag Scriptor, 2006, 3-589-24102-0

- [10] Em.Univ.-Prof. DI Dr.techn. Richard Muckenhuber: „Vorlesungsskriptum - Elektrische Anlagen 1“, TU Graz, 1978
- [11] Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert: „Vorlesungsskriptum - Elektrische Energiesysteme 1“, TU Graz, 2006
- [12] Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert: „Vorlesungsskriptum - Schutz und Versorgungssicherheit elektrischer Energiesysteme“, TU Graz, 2009
- [13] DI Dr.techn. Ernst Schmutzger, A.o. Univ.-Prof. DI Dr.techn. Rudolf Woschitz: „Vorlesungsskriptum - Sicherheit und Schutzmaßnahmen“, TU Graz, 2001/2002
- [14] Ao. Univ.-Prof. DI Dr.techn. Herwig Renner, DI Dr. techn. Georg Achleitner, DI Werner Friedl, „Laborskript Elektrische Energiesysteme“, TU Graz, 2006
- [15] HÜTTE Taschenbücher der Technik: „Elektrische Energietechnik“, Band 3 Netze, 29. Auflage, Springer-Verlag, 1988, 3-540-15359-4
- [16] D. Oeding, B. R. Oswald: „Elektrische Kraftwerke und Netze“, 6. Auflage, Springer-Verlag, 2004, 3-540-00863-2
- [17] L. Heinhold, R. Stubbe: „Kabel und Leitungen für Starkstrom“, 5.Auflage, Publicis MCD Verlag, 1999, 3-89578-088-X
- [18] IMB Stromversorgungssysteme GmbH: „Bedienungsanleitung 220V DC-Systemüberwachung“
- [19] DI Walther Bender GmbH & Co. KG: „Verfahren und Errichtung zur Isolationsüberwachung von ungeerdeten Gleich- und Wechselstromnetzen“, Juni 1995, DE 43 39 946 A1
- [20] DI W. Bender GmbH & Co. KG: „Verfahren und Vorrichtung zur Isolationsüberwachung von ungeerdeten Gleich- und Wechselspannungsnetzen“, Dezember 2012, EP 2 256 506 A1
- [21] Bender GmbH & Co. KG: „Bedienungshandbuch A-Isometer IRDH575“
- [22] Bender GmbH & Co. KG: „Bedienungshandbuch EDS460-DG“
- [23] Schrack Technik GmbH: „Der FI-Schalter, unser verkanntes Genie“
- [24] Siemens AG: „Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen“, 2010

- [25] ÖVE/ÖNORM E 8001-6-61, „Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V Teil 6-61: Prüfungen - Erstprüfungen“, Juli 2001
- [26] DIN VDE 0100-610 (VDE 0100-610), „Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 6-61: Prüfungen - Erstprüfungen“, April 1994
- [27] DIN VDE 0100-610 (VDE 0100-610), „Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 6-61: Prüfungen - Erstprüfungen“, April 2004
- [28] DIN VDE 0100-600 (VDE 0100-600), „Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 6: Prüfungen“, Juni 2008

## 9 Anhang

Bei den Messungen im Labor wurden folgende Geräte verwendet:

- Metrahit 29S
- Dewe-3020
- Omicron CMC 256-6
- Widerstandsschaltung
- 220 V DC-Systemüberwachung der Firma IMB
- IRDH575B1-435 der Firma Bender