



Manuel Promberger, BSc

Labordemonstrator zur automatisierten Rekonfiguration im Niederspannungsnetz

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium

Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber

Institut für Elektrische Anlagen und Netze

Dipl.-Ing. Daniel Herbst, BSc

Graz, Juni 2021

Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Prof. Robert Schürhuber, für die Möglichkeit, den Labordemonstrator zu errichten und eine Masterarbeit dazu zu verfassen, bedanken.

Für die Unterstützung meiner Arbeit (zu jeder Tageszeit) möchte ich mich besonders bei meinem Co-Betreuer Dipl.-Ing. Daniel Herbst bedanken. Deine strukturierte Denkweise und dein Wissen über viele verschiedene Normen haben mir aus so mancher Zwickmühle geholfen.

Mein Dank gilt auch der Firma Kraus & Naimer, welche mich bezüglich des verwendeten Systemumschalters hervorragend beraten und uns den Systemumschalter kostenlos zur Verfügung gestellt hat. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei der Firma ELSTA-Mosdorfer für die Beratung sowie die kostenlose Bereitstellung des Verteilers.

Ein weiterer Dank geht an meine beiden Studienkollegen Rene Griesser und Andreas Paratscher, die mich bei der Kommunikation zwischen Mensch, Computer und dem Kommunikationsmodul geistig unterstützt haben.

Für das Korrekturlesen meiner Diplomarbeit möchte ich mich bei Alexandra Hochsteger und Dipl.-Ing. Martin Fürnschuß bedanken.

Ein großes Dankeschön geht an meine Eltern Ernst und Eleonore Promberger und an meine Geschwister Sandra, Markus und Martin Promberger, die mich immer finanziell und mental unterstützt haben.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei all meinen Freunden bedanken, die immer ein offenes Ohr für meine Herausforderungen während des Studiums hatten und mich auf so manchen Spaziergängen oder bei anderen Aktivitäten begleitet haben, um mir zu helfen, wieder einen klaren Kopf zu bekommen.

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. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am 02.06.2021

Manuel Promberger, BSc

Kurzfassung

Die Weiterentwicklung des Niederspannungsnetzes von einem konventionellen zu einem Smart Grid birgt noch viele Herausforderungen. Eine davon ist beispielweise die Transformation des bisherigen radialen Netzes mit dessen unidirektionalen Lastfluss hin zu einem, überwiegend von Prosumern genutzten, vermaschten Netz. Dazu wird im Zuge dieser Arbeit ein Labordemonstrator entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen, welcher einen Teil eines Niederspannungsnetzes samt vier Leistungsschaltern in Form einer Ringstruktur abbildet. Zwischen den einzelnen Schaltelementen befinden sich Abgänge, an welche Lasten und Quellen (zB emulierte PV-Anlagen) angeschlossen werden können. Mit dem entwickelten Labordemonstrator lassen sich Versuche zum Konzept einer automatisierten Netzrekonfiguration, zur Selektivität, zu Netztopologien oder zu Niederspannungsschaltgeräten durchführen. Weiters werden im Rahmen dieser Masterarbeit die normativen Aspekte des Aufbaus einer Niederspannungs-Schaltgerätekombination behandelt sodass in Zukunft ein entsprechender Leitfaden am Institut zur Verfügung steht.

Schlüsselwörter: Niederspannungsnetz, Smart Grid, automatisierte Netzrekonfiguration, Niederspannungsleistungsschalter, Selektivität, Netztopologien, Niederspannungsschaltgeräte

Abstract

The further development of the low-voltage grid from a conventional to a smart grid still poses many challenges. One of them is, for example, the transformation of the previous radial low-voltage grid with its unidirectional load flow to a meshed one used predominantly by prosumers. For this purpose, a laboratory demonstrator was developed, set up and put into operation in the course of this work, which represents a part of a low-voltage grid including four circuit breakers in the form of a ring structure. Between the individual switching elements there are outgoing circuits to which loads and sources (e.g., emulated PV systems) can be connected. The developed laboratory demonstrator can be used to conduct experiments on the concept of automatic grid reconfiguration, selectivity, grid topologies or low-voltage switching devices. Furthermore, the standards aspects of the construction of a low-voltage switchgear and controlgear assembly were dealt with in the context of this master's thesis, so that a corresponding guideline will be available at the institute in the future.

Keywords: low-voltage grid, smart grid, automatic grid reconfiguration, low voltage circuit breakers, selectivity, grid topologies, low voltage switching devices

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen.....	2
2.1	Topologien der österreichischen Stromnetze	2
2.1.1	Strahlennetz	3
2.1.2	Ringnetz	4
2.1.3	Maschennetz	4
2.2	Selektivität	5
2.2.1	Vollselektivität.....	5
2.2.2	Teilselektivität.....	5
2.3	System nach Art der Erdverbindung	5
2.3.1	TN-System	6
2.3.2	TT-System.....	8
2.3.3	IT-System.....	9
2.4	Schutzmaßnahmen und Schutzvorkehrungen	10
2.4.1	Basisschutz	12
2.4.2	Fehlerschutz.....	12
2.4.3	Zusatzschutz	13
2.5	Fehlerstromschutzeinrichtung.....	13
2.6	Überstrom-Schutzeinrichtungen.....	15
2.6.1	Sicherungslasttrennschalter.....	15
2.6.2	Leitungsschutzschalter	16
2.6.3	Leistungsschalter.....	17
2.6.4	Einstellbereiche	19
2.7	Automatisierte Rekonfiguration im Niederspannungsnetz.....	20
2.8	Gesetzliche und normative Grundlagen bei der Entwicklung und dem Aufbau von Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen	21
2.8.1	Allgemeines.....	21
2.8.2	Bemessungswerte von Schnittstellen	22
2.8.3	Umgebungsbedingungen.....	23

2.8.4	Anforderungen beim Bau eines Verteilers.....	24
2.8.5	Normative Dokumente	25
3	Methoden.....	27
3.1	Planung des Laboraufbaues	27
3.2	Wahl der Komponenten	29
3.2.1	Leistungsschalter.....	29
3.2.2	Systemumschalter	33
3.2.3	Kommunikation.....	33
3.2.4	Abgänge.....	34
3.2.5	Anschlussvarianten durch unterschiedliche Steckverbinder.....	35
3.2.6	Verteiler	36
3.2.7	Leitungsmodul	36
3.3	Elektrische Auslegung	37
3.3.1	Bemessungsströme der Sicherungen	37
3.3.2	Leiterquerschnitte	37
3.4	Mechanische Auslegung.....	38
4	Ergebnisse	39
4.1	Laboraufbau	39
4.2	Konfiguration der Kommunikationsparameter	47
4.3	Prüfungen bzw. Messungen	48
4.3.1	Allgemeine Inbetriebnahme	49
4.3.2	Überprüfung der Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag.....	50
4.3.3	Strom- und Spannungsmessung.....	52
4.3.4	Kennlinie und Meldungsübersicht der Leistungsschalter.....	55
4.3.5	Unsymmetrische Stromaufteilung je Phase	57
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	58
6	Literatur	60
7	Anhang	64
7.1	Datenblätter	64

7.1.1	Leistungsschalter 3VA2025-5KQ42-0AA0 [33]	64
7.1.2	Leistungsschalter Sockel [33]	67
7.1.3	Synchronisierungsfähiger Motorantrieb [33].....	68
7.1.4	Systemumschalter KG105.K950.E [43].....	70
7.1.5	Verteiler DH F5 1080-850/470 (Fabrikat ELSTA Mosdorfer) [44]	71
7.1.6	Sicherheits-Einbaustecker ID/S6AR-N-B4S und Sicherheitsbuchse SLB-F6,3 (Fabrikat Stäubli) [32]	72
7.2	AutoCAD Plan (*.dwg)	75
7.2.1	Projektierte Frontansicht des Verteilers mit Teilverkabelung	75
7.2.2	Projektierte seitliche Ansichten des Labordemonstrators	76
7.3	Siemens powerconfig Software.....	77
7.4	Messwerte	78
7.4.1	Strom und Spannungsmessung.....	78
7.4.2	Niederohmmessung.....	78
7.4.3	Unsymmetrische Stromaufteilung	79

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (en. alternating current)
APG	Austrian Power Grid
C	combiné
DC	Gleichstrom (en. direct current)
DIAZED	Diametrisch abgestufter zweiteiliger Edison-Schmelzstöpsel
EMV	Elektromagnetischer Verträglichkeit
ESV	Elektroschutzverordnung
ETG	Elektrotechnikgesetz
ETU	Elektronischer Überstromauslöser (en. electronic trip unit)
ETV	Elektrotechnikverordnung
FI/RCD	Fehlerstromschutzschalter (en. Residual Current Device)
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
I	Isolé
I-Schutz	Unverzögerter Kurzschlusschutz (en. instantaneouse, I)
KS	Kurzschluss
LS	Leistungsschalter
L-Schutz	Überlast-Schutz (en. long time delay, L)
LSS/MCB	Leitungsschutzschalter (en. Miniature circuit breaker)
N	Neutre
NEOZED	Neuartige diametrisch abgestufter zweiteiliger Edison-Schmelzstöpsel
NH-Sicherung	Niederspannungs-Hochleistung Sicherung
Pos.	Position
PoSyCo	Forschungsprojekt Power System Cognification
PV-Anlagen	Photovoltaik-Anlagen
RDF	Bemessungsbelastungsfaktor (en. Rated Diversity Factor)
S	séparé
Schukostecker	Schutzkontaktstecker
SI	Systeme Internationale d'unites
S-Schutz	Kurzzeitverzögerter Kurzschlusschutz (en. short time delay)
T	Tera
TM	Thermisch-magnetischer Überstromauslöser

Symbol- und Einheitenverzeichnis

A	Ampere, SI-Einheit der elektrischen Stromstärke
f	Relativer Messfehler
f_n	Bemessungsfrequenz
Hz	Herz, die Einheit der Frequenz
I_{cc}	Bedingter Bemessungskurzschlussstrom einer Schaltgerätekombination
I_{cu}	Bemessungs-Grenzkurzschlussausschaltvermögen
I_{cw}	Bemessungskurzzeitstromfestigkeit eines Stromkreises
I_f	Großer Prüfstrom
I_i	Unverzögerter Auslösestrom
I_n	Maximaler Bemessungsbetriebsstrom beim LS
I_n	Bemessungsstrom bei LSS, FI und weitere Sicherungen
I_{nA}	Bemessungsstrom der Schaltgerätekombination
I_{nc}	Bemessungsstrom eines Stromkreises
I_{nf}	Kleiner Prüfstrom
I_{pk}	Bemessungsstoßstromfestigkeit
I_r	Stromeinstellwert einstellbarer Überlastauslöser
I_{sd}	Kurzzeitverzögerter Auslösestrom
$I_{\Delta n}$	Bemessungsfehlerstrom
kg	Kilogramm, SI-Einheit der Masse
m	Meter, SI-Einheit der Länge
s	Sekunde, SI-Einheit der Zeit
t_r	Zugehörige Auslösezeit zu Stromeinstellwert einstellbarer Überlastauslöser
t_{sd}	Verzögerungszeit des S-Auslösers
U_e	Bemessungsbetriebsspannung
U_i	Bemessungsisolationsspannung eines Stromkreises
U_{imp}	Bemessungsstoßspannungsfestigkeit der Schaltgerätekombination
U_n	Bemessungsspannung der Schaltgerätekombination
V	Volt, SI-Einheit der elektrischen Stromstärke
W	Watt, die Einheit der elektrischen Wirkleistung
Ω	Ohm, die Einheit des elektrischen Widerstandes



1 Einleitung

Die Entdeckung der Elektrizität gilt als wichtiger Meilenstein der menschlichen Geschichte. Durch die Erfindung des Wechselstroms und deren Transformation auf eine höhere Spannungsebene gelang es, eine flächendeckende Versorgung mit elektrischem Strom zu erreichen. Dabei muss jedoch auf das Gleichgewicht aus erzeugter und verbrauchter elektrischer Energie geachtet werden da Elektrizität nur schwer speicherbar ist. Besteht eine Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch, so führt dies zu einer Abweichung der Netzfrequenz und der Spannung vom Nennwert und ab einem gewissen Maß kann die Stromversorgung nicht mehr aufrechterhalten werden. Durch die Besonderheit der Nichtspeicherbarkeit elektrischer Energie, muss diese bei einem Überangebot entsprechend umgewandelt und/oder zwischengespeichert werden. In Österreich wird überschüssige elektrische Energie vorrangig in Pumpspeicherkraftwerken in stationäre Energie umgewandelt und zwischengespeichert. In diesen wird Wasser in eine höhere Lage mit elektrisch angetriebenen Pumpen gepumpt (Pumpbetrieb) und bei einer Unterdeckung dieses wieder mittels Turbinen und Generatoren in Elektrizität umgewandelt (Turbinieren) und in das Versorgungsnetz gespeist. Der Nachteil besteht dabei, dass bei einer Umwandlung auch von elektrischer Energie in eine andere Energieform (und wieder zurück) immer Verluste entstehen. Umso geringer diese Verluste sind, desto effizienter ist die Form der Energiezwischenlagerung. [1]

Große rotierende Massen wie sie in unter anderem in konventionellen thermischen Kraftwerken vorkommen, sorgen mit ihrer trägen Masse für ausreichend Stabilität im elektrischen Stromnetz. Aufgrund der steigenden CO₂-Emissionen sowie der ambitionierten Ziele der „Mission 2030“ [2] (Stromerzeugung zu 100 % aus erneuerbaren Energien) verlieren diese Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen immer mehr an Bedeutung und werden voraussichtlich in den nächsten Jahren eingestellt. Aufgrund dieses Zieles der „Mission 2030“ wird der Ausbau an erneuerbaren Energien, insbesondere der Photovoltaik Anlagen (PV-Anlagen), in Österreich vorangetrieben was zu zukünftigen Herausforderungen im Niederspannungsnetz führt. Diese neuartigen Herausforderungen begründen sich einerseits auf einer wachsenden Anzahl an Verbrauchern mit hohen elektrischen Leistungen wie beispielsweise Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge, Klimaanlage und andererseits auf der steigenden Einspeisung durch dezentrale Erzeuger wie beispielsweise PV-Anlagen. Diese sehr rasch zunehmenden Verbraucher und Erzeuger, führen zu dezentralen Überlastungen des Stromnetzes. Ein weiterer Effekt ist der wechselnde Lastfluss im Niederspannungsnetz von einem bisherigen unidirektionalen zu einem zukünftigen bidirektionalen Lastfluss. Jene Lastflüsse sind bereits aus den übergeordneten Netzebenen bekannt und werden dort unter Einsatz anderer Netzformen und mittels intelligenter Schutzgeräte bzw. -konzepte bewältigt. Zur weiteren Untersuchung von unterschiedlichen Lösungsansätzen der genannten Herausforderungen, wird im Zuge dieser Masterarbeit ein Labordemonstrator entwickelt und aufgebaut, welcher einen Teil eines Niederspannungsnetzes grundsätzlich nachbilden soll und vier intelligente Leistungsschalter mit integrierten Schutzfunktionen beinhaltet. [3]

2 Grundlagen

2.1 Topologien der österreichischen Stromnetze

Das öffentliche österreichische 50-Hz-Stromversorgungsnetz teilt sich prinzipiell in das Übertragungsnetz und das Verteilnetz auf. Das Übertragungsnetz wird im größten Teil Österreichs von der Austrian Power Grid (APG) betrieben und weist drei Spannungsebenen auf. Die unterschiedlichen Spannungsebenen sind über Transformatoren miteinander verbunden, wobei die oberen beiden Spannungsebenen das Höchstspannungsnetz mit 380 kV und 220 kV Nennspannung bilden. Ziel der APG ist es einen sogenannten 380-kV-Sicherheitsring zu errichten damit alle großen Verbrauchszentren von zwei Seiten mit dem Übertragungsnetz verbunden sind. Dieses Höchstspannungsnetz ist an den Grenzen von Österreich mit dem Europäischen Verbundnetz verbunden. Aus historischen Gründen befinden sich Teile der 110-kV-Ebene im Besitz der APG welche zukünftig auf höhere Spannungsebenen umgebaut werden sollen. Abbildung 1 zeigt das österreichische Übertragungsnetz mit den aktuellen Projekten in Salzburg. Über die Netzknoten (u.a. rote Dreiecke) ist das Übertragungsnetz mit dem Verteilnetz verbunden. Die APG übernimmt dabei die Rolle des Regelzonenführers wessen Aufgabe es ist, für den permanenten Ausgleich von Stromerzeugung und Stromverbrauch zu sorgen. Dafür wird die Frequenz, die Spannung und die Ströme an unterschiedlichen Punkten im Netz gemessen und bei Über- oder Unterschreitungen gewisser Grenzwerte werden sofort Maßnahmen getroffen. [4]

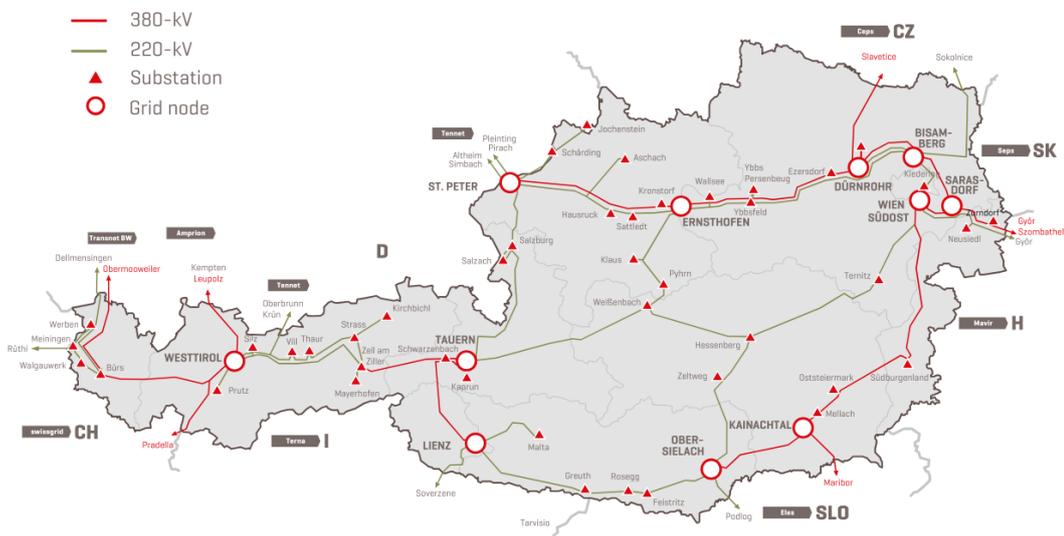


Abbildung 1: Österreichisches Übertragungsnetz der APG [4]

Das Verteilnetz befindet sich in den einzelnen Bundesländern und umfasst die Spannungsebenen Hoch- (teilweise), Mittel- und Niederspannung. Es wird von vielen verschiedenen Netzbetreibern betrieben welche unterschiedliche Verbraucher je nach deren elektrischer Anschlussleistung aus anderen Spannungsebenen versorgen. Die Stahlindustrie als einer der größten Energieverbraucher Österreichs wird zB von Hochspannungsebene aus

versorgt. Mittlere Industriebetriebe wie zB die Papierindustrie werden aus der Mittelspannungsebene versorgt, die Spannungshöhe dabei liegt im Bereich von 10 kV bis 30 kV. Kleine Industriebetriebe, Gewerbebetriebe, Dienstleister und private Haushalte werden auf der Ebene der Niederspannung (Nennspannungen kleiner 1 kV) versorgt. Bei den angegebenen Spannungswerten handelt es sich um Nennwerte von Wechselspannungen (Wechselstrom, en. alternating current, AC) welche als Effektivwerte der jeweiligen Leiter-Leiter-Spannungen angegeben werden. [1, 4, 5]

Zur Sicherstellung einer möglichst effizienten Energieversorgung, kommen je nach geografischer Lage und regionalem elektrischen Energiebedarf unterschiedliche Netztopologien zum Einsatz. Die Effizienz in der Energieversorgung bildet sich aus Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit. [1]

In nachfolgenden Unterkapiteln werden die wichtigsten drei Netz Topologien näher erläutert.

2.1.1 Strahlennetz

Das Strahlennetz bildet die Grundlage jeder weiteren Topologie und ist so aufgebaut, dass die Verbraucher von einer Seite über einen Strang mit der Quelle verbunden sind. Diese Netzform ist im ländlichen Stromnetz am häufigsten anzutreffen. Daraus ergibt sich ein einfacher und kostengünstiger Aufbau und eine einfache Erweiterungsmöglichkeit des Netztes. Ein wesentlicher Nachteil dieses Systems ist die begrenzte Belastbarkeit am Ende eines Abganges aufgrund des Spannungsabfalls entlang der Leitung. Daher ist die Länge eines Stranges in Abhängigkeit seiner Verbraucher begrenzt. Ein weiterer Nachteil ist, falls ein Fehler im Strang auftritt, wird dieser als Ganzes vom Netz getrennt bis der Fehler behoben ist. Das führt zu einer geringen Ausfallsicherheit dieser Netzform. [1, 6] In Abbildung 2 ist ein Beispiel für diese Netzform abgebildet.

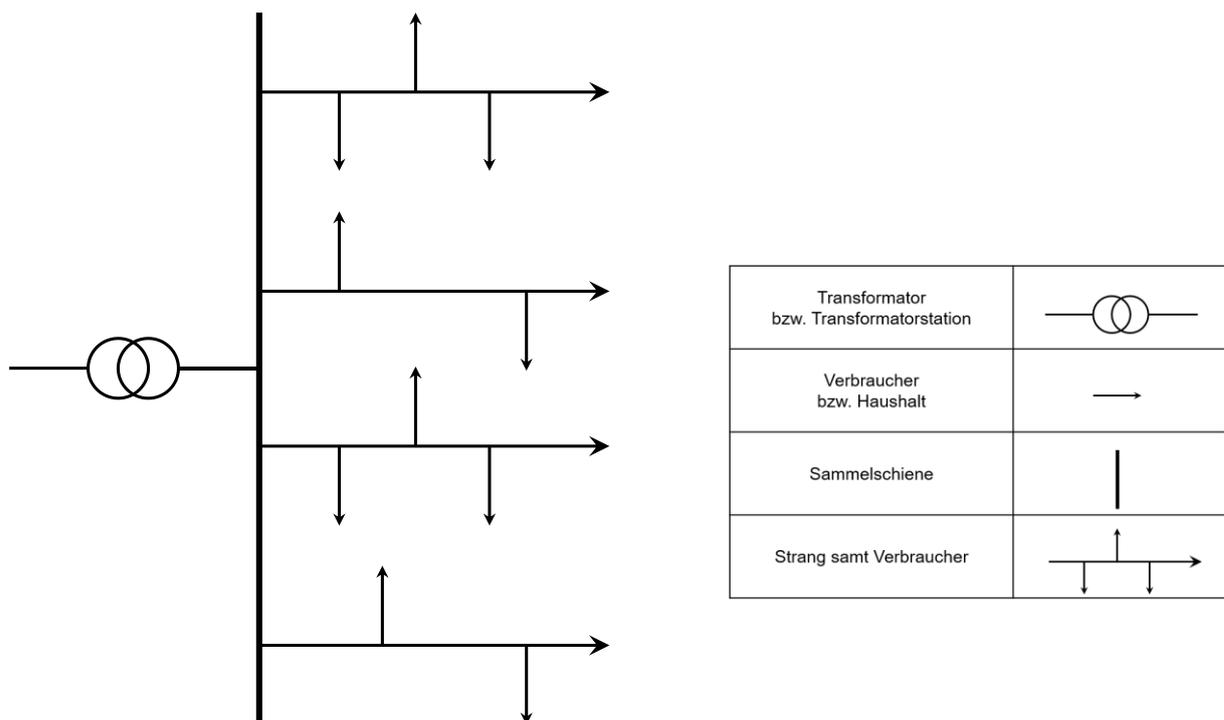


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Strahlennetzes

2.1.2 Ringnetz

Das Ringnetz ist eine Erweiterung des Strahlennetzes und schafft die Möglichkeit, zwei Stränge miteinander zu verbinden. Man unterscheidet dabei zwischen einem offenen und einem geschlossenen Ringnetz, weitere finden im österreichischen Höchst-, Hoch- und Mittelspannungsnetz ihren Einsatz. Offene Ringstrukturen kommen hingegen auf allen Spannungsebenen zum Einsatz. Das offene Ringnetz hat den Vorteil, dass durch die offene Verbindungs- bzw. Trennstelle eine Stromversorgung von einer zweiten Seite gewährleistet werden kann, was die Ausfallsicherheit des Netzes entsprechend erhöht. Ein wesentlicher Nachteil bei einem geschlossenen Ring ist jedoch die eindeutige Erkennung des Fehlerortes was wiederum zu einer erhöhten Kommunikationsanforderung an den Schutz in diesem Bereich führt. [1, 6] In der nachfolgenden Abbildung 3 ist ein Beispiel dieser Netzform dargestellt.

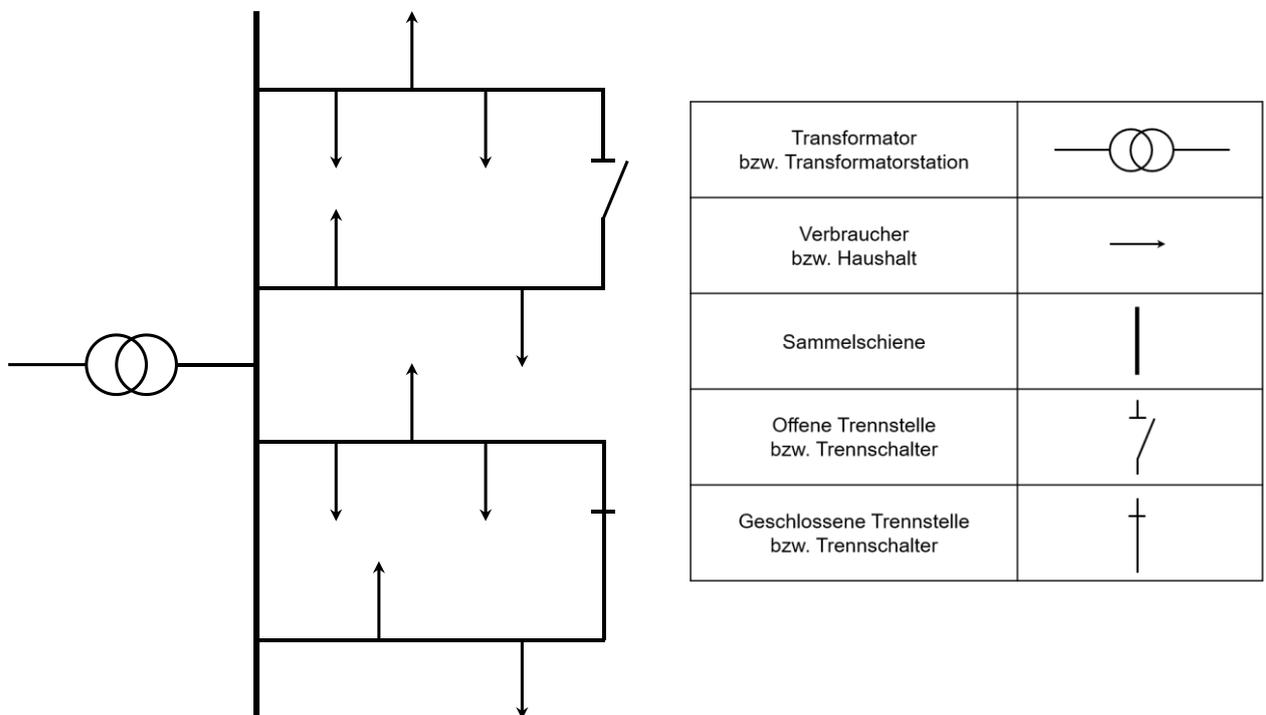


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Ringnetzes

2.1.3 Maschennetz

Ein Maschennetz ist ein Zusammenschluss aus mehreren Ringnetzen mit unterschiedlichen Speisepunkten was den Vorteil einer höheren Versorgungszuverlässigkeit ergibt. Aufgrund der Komplexität dieser Netzform steigen die Anzahl und Anforderungen an die Schutzgeräte was zu einer entsprechenden Erhöhung der Kosten führt. Ein weiterer Nachteil ist die erschwerte Möglichkeit einer selektiven Abschaltung im Fehlerfall, aufgrund der unterschiedlichen Richtungen des Lastflusses im Netz. [1, 6] Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für diese Netzform mit zwei Speisepunkten.

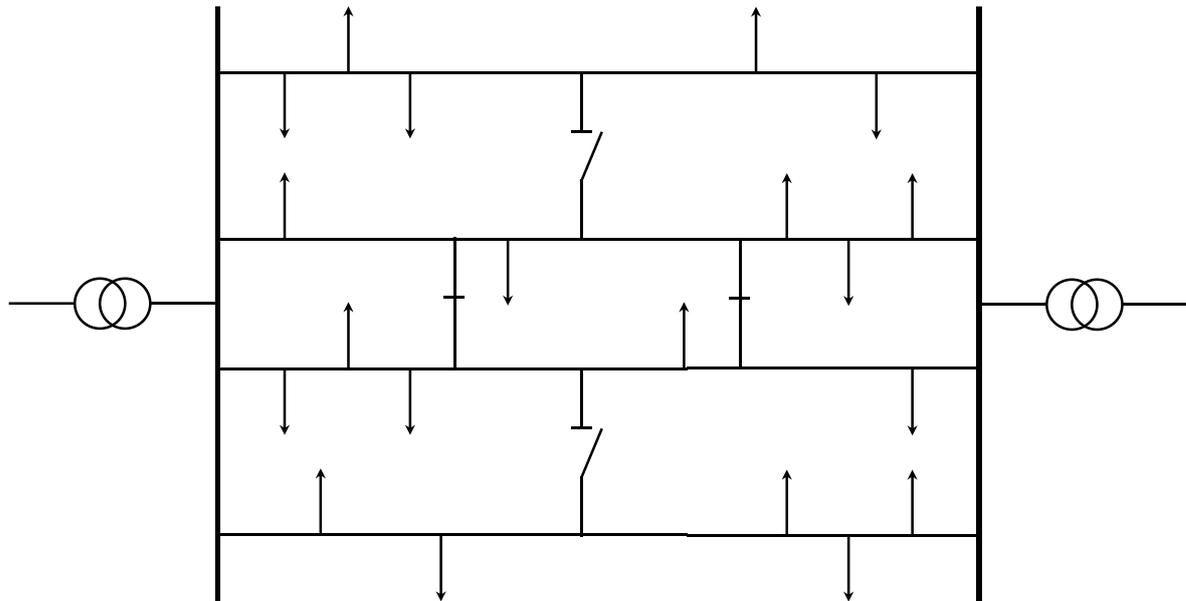


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines vermaschten Netzes

2.2 Selektivität

Selektivität bedeutet, dass immer jenes Schutzgerät, welches sich der Fehlerstelle am nächsten in Richtung Quelle befindet, anspricht und somit immer der kleinstmögliche Bereich (die geringste Anzahl an Verbrauchern) vom restlichen Netz getrennt wird. [7]

Dabei wird zwischen Vollselektivität, Teilselektivität und nicht selektiven Bereiche unterschieden. Welche Selektivität gefordert ist wird durch Hersteller, Normen oder Betreiber eines Netzes bzw. einer elektrischen Anlage festgelegt.

2.2.1 Vollselektivität

Vollselektivität bedeutet, es löst immer jener Bereich aus, welcher der Fehlerstelle am nächsten liegt, egal wie hoch die Amplitude des Fehlerstroms ist. Dies kann durch Zeitstaffelung oder durch blockieren der übergeordneten Schutzgeräte realisiert werden. Eine Anlage gilt als vollselektiv, wenn sich die Auslösekennlinien der Schutzgeräte in keinem Bereich überschneiden. [8]

2.2.2 Teilselektivität

Teilselektivität bedeutet, dass einzelne Bereiche selektiv sind, jedoch wird ab einem gewissen Bemessungskurzschlusswert die gesamte Anlage ausgeschaltet. Eine Anlage gilt als teilselektiv, wenn Überschneidungen der Auslösekennlinien der Schutzgeräte nicht immer vermieden werden. [8]

2.3 System nach Art der Erdverbindung

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Systeme nach Art der Erdverbindung bei Wechselstromnetzen gemäß OVE E 8101:2019-01-01 [8], auch Netzsysteme genannt, näher

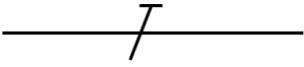
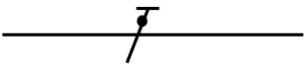
erläutert. Im Wesentlichen gibt es europaweit drei unterschiedliche Netzsysteme im Bereich der Niederspannung.

Diese Netzsysteme werden mit zwei Buchstaben gekennzeichnet. Jener an erster Stelle gibt Auskunft über das Erdungsverhältnis des Netzes bzw. der Quelle. Der Buchstabe T (Tera) bedeutet an erster Stelle, dass eine niederohmige Verbindung des Sternpunktes zum Erdpotential vorhanden ist. Im Gegensatz dazu bedeutet ein I (Isolé) an erster Stelle, dass kein Punkt mit Erde verbunden ist oder ein Punkt mit Erde über eine hohe Impedanz verbunden ist.

An zweiter Stelle kommen ebenfalls zwei verschiedenen Buchstaben zum Einsatz welche das Erdungsverhältnis der elektrischen Geräte, die in den Anlagen vorkommen, angeben. Einerseits gibt es erneut den Buchstaben T (Tera) welcher wieder angibt, dass eine direkte Verbindung des zu schützenden Gerätes und Erde besteht. Der weitere Buchstabe N (Neutre) bedeutet, dass alle elektrischen Geräte mit ausgeführten Schutzleitern mit dem geerdeten Sternpunkt des Systems verbunden sind. Daraus lässt sich schließen, dass ein N an zweiter Stelle nur mit einem T an erster Stelle kombinierbar ist. [8, 9]

Tabelle 1 zeigt die Legende für die nachfolgenden Netzsysteme.

Tabelle 1: Legende für die Systeme nach Art der Erdverbindung von Abbildung 5 bis Abbildung 9 [8]

	Neutralleiter; Mittelleiter
	Schutzleiter
	PEN-Leiter bzw. kombinierter Schutz- und Neutralleiter

2.3.1 TN-System

Gemäß der Bedeutung der beiden Buchstaben ist im TN-System der Sternpunkt der Stromversorgung direkt mit Erde und die Betriebsmittel über einen Schutzleiter mit diesem Punkt verbunden. Durch die Ausführung des Schutzleiters und des Neutralleiters wird dieses System weiters in drei Teilsysteme unterteilt. Dafür kommen zwei weitere Buchstaben zum Einsatz. Der Buchstabe S (séparé) bedeutet, dass der Neutralleiter vom Schutzleiter getrennt ausgeführt ist. C (combiné) ist das Gegenstück dazu und bedeutet, dass der Schutzleiter kombiniert mit dem Neutralleiter als PEN-Leiter ausgeführt ist.

In Abbildung 5 ist ein TN-S-System dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass alle elektrischen Körper mit dem Schutzleiter verbunden sind und der Schutzleiter vom Neutralleiter getrennt geführt wird. Dieses System kommt in öffentlichen Verteilnetzen nicht zum Einsatz. [8, 9]

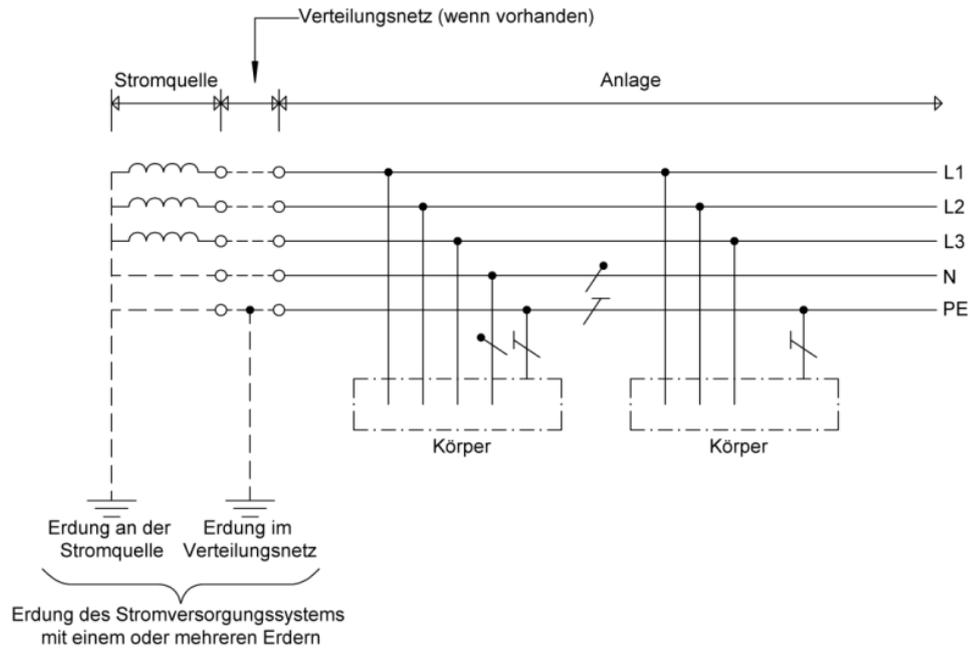


Abbildung 5: TN-S-System [8]

In Abbildung 6 ist das kombinierte TN-C-S-System dargestellt welches zum großen Teil in Hausinstallationen, Industrie und Gewerbe verwendet wird. Dabei wird der kombinierte PEN-Leiter ab einem gewissen Punkt getrennt ausgeführt. Am Beispiel einer Hausinstallation befindet sich der Speisepunkt der Anlage im Hausanschlussverteiler von wo aus der Schutzleiter getrennt vom Neutraleiter geführt wird. Wichtig dabei ist die verpflichtende Erdung der Anlage (Anlagenerder) am Speisepunkt. [8, 9]

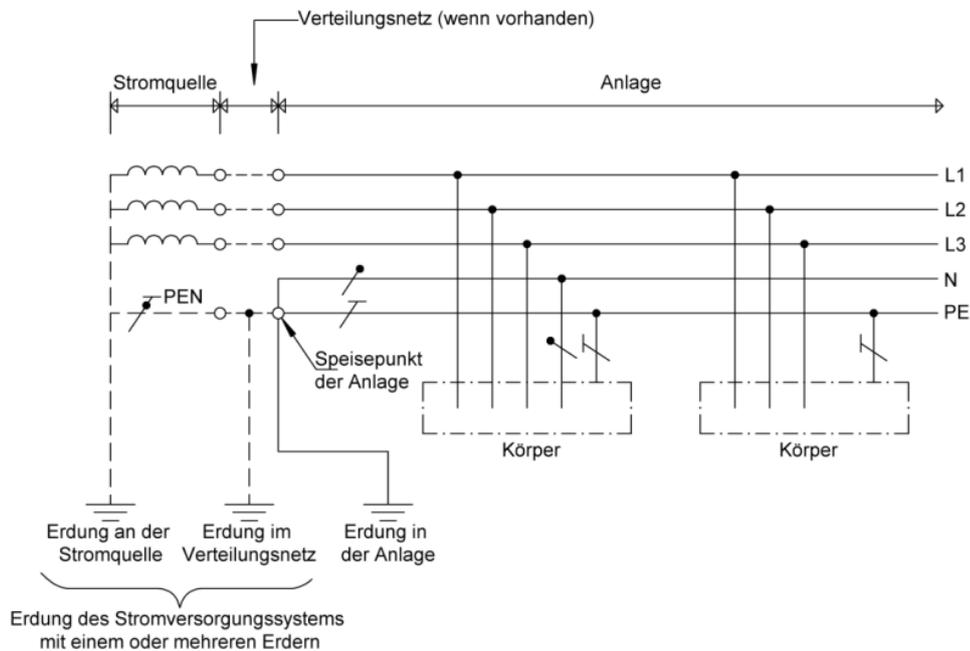


Abbildung 6: TN-C-S-System [8]

Als letztes System ist in Abbildung 7 das TN-C-System abgebildet. In diesem System wird der PEN-Leiter dauerhaft im gesamten Netz geführt. Dieses System ist bei Errichtung einer neuen elektrischen Anlage nicht zugelassen und findet in Österreich nur für das Verteilnetz Anwendung. [8, 9]

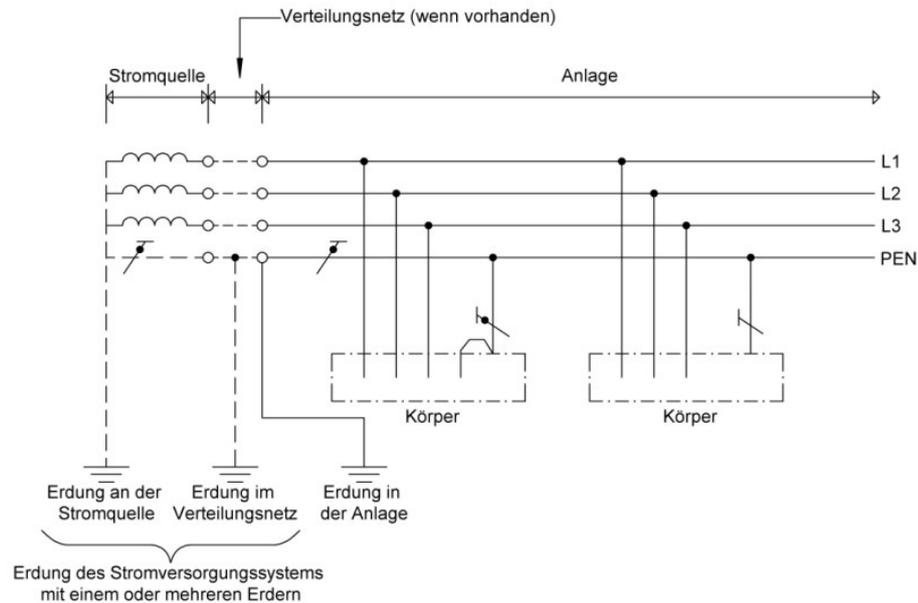


Abbildung 7: TN-C-System [8]

2.3.2 TT-System

Abbildung 8 zeigt ein TT-System in welchem die Erdung der Anlage (Anlagenerder) nicht mit der Erdung der Stromquelle (Betriebserder) über eine elektrische Leitung (PE oder PEN) verbunden ist. Dieses System wird in manchen Bereichen noch verwendet, wird aber bei neuen Anlagen nicht mehr empfohlen. Ausnahmen gibt es im Bereich von Bahnstromanlagen aufgrund der Gefahr von induzierten Strömen über Erde. [8, 9]

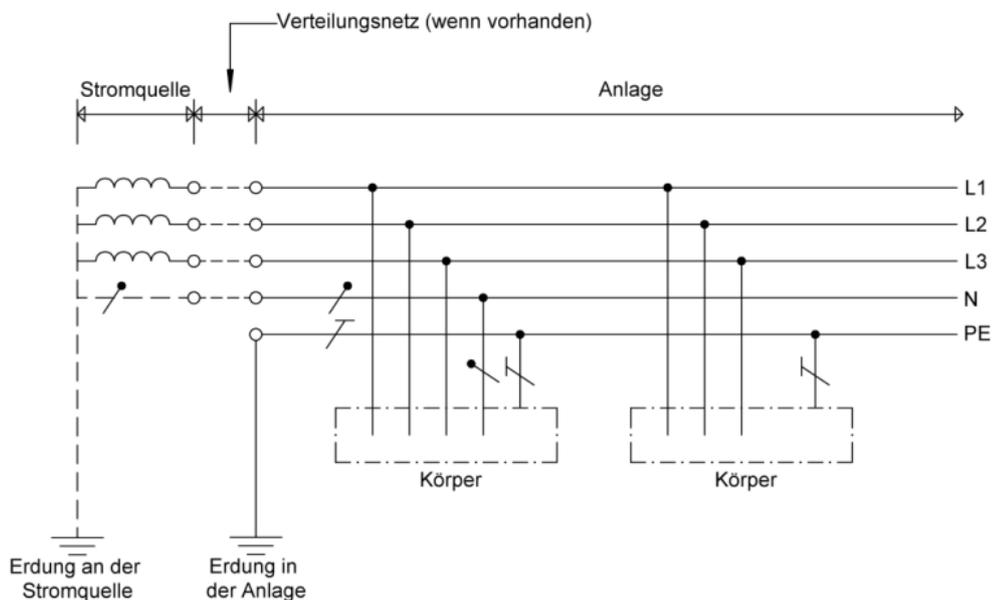
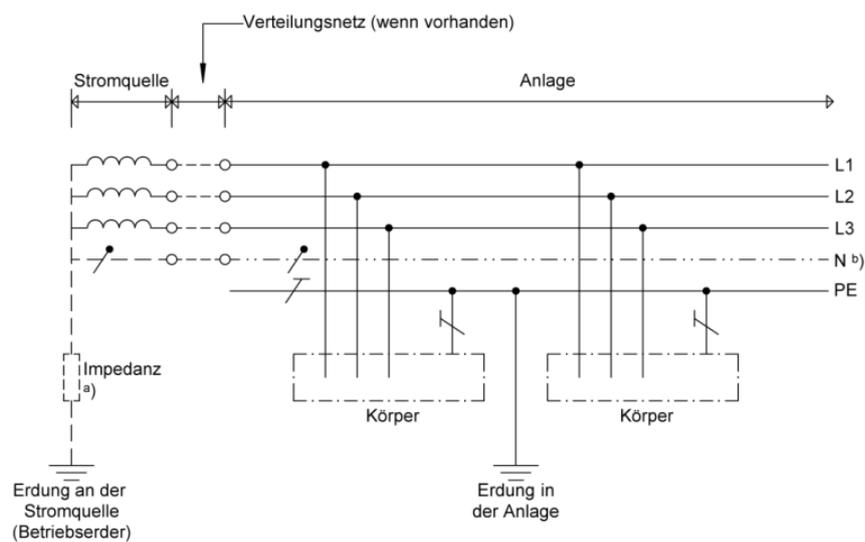


Abbildung 8 TT-System [8]

2.3.3 IT-System

Abbildung 9 zeigt ein IT-System mit isoliertem oder hochohmig geerdeten Sternpunkt. Dieses System findet seine Anwendung in den Bereichen, wo ein Ausfall der gesamten Anlage durch einen einzelnen Fehler an einem Körper zu schweren finanziellen oder gesundheitlichen Folgen führen kann wie zB in Krankenhäusern oder Industrieanlagen. Aufgrund der relativ geringen Größe dieses Systems fließt im Fehlerfall ein geringer kapazitiver Fehlerstrom gegen Erde. Daher ist ein sofortiges Abschalten eines ersten Fehlers nicht notwendig, jedoch sollte er schnellstmöglich geortet und behoben werden. Erst bei einem zweiten Fehler muss eine sofortige Abschaltung erfolgen. Damit dies nicht geschieht, muss die Anlage rund um die Uhr überwacht werden und im Fehlerfall Fachpersonal einsatzbereit sein. Die Körper (Betriebsmittel) können dabei einzeln oder gesamt geerdet werden. [8, 9, 10]



Legende

- a Das System darf mit Erde über eine ausreichend hohe Impedanz verbunden sein. Diese Verbindung darf zB am Mittelpunkt oder einem künstlichen Mittelpunkt, oder an einem Außenleiter ausgeführt werden.
- b Der N-Leiter darf, muss aber nicht verteilt sein.

Abbildung 9: IT-System [8]

2.4 Schutzmaßnahmen und Schutzvorkehrungen

Unter Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag versteht man jene Maßnahmen, welche das Auftreten von gefährlich hohen Strömen durch den menschlichen oder tierischen Körper verhindern sollen. Diese Ströme können je nach Art und Höhe der Spannung zu Beeinträchtigungen des Herzens, insbesondere zu Herzkammerflimmern führen. Dies gilt es daher mit hoher Priorität zu verhindern oder den Strom so klein zu halten, dass keine Auswirkungen spürbar sind. Die dahingehenden Grenzwerte sind Abbildung 10 und Tabelle 2 zu entnehmen, die abgebildete Kennlinie ist in vier Bereiche AC-1 bis AC-4 unterteilt, wobei in jeder Zone ein anderer physiologischer Effekt auf den menschlichen Körper erfolgt. [8, 11]

Tabelle 2: Grenzwerte und physiologische Effekte der Zeit/Strom-Bereiche für Wechselstrom bei Frequenzen von 15 Hz bis 100 Hz für den Pfad Hand zu Fuß zu Abbildung 10 [11]

Bereiche	Grenzwerte	Physiologische Effekte
AC-1	Bis zu 0,5 mA Kurve a	Wahrnehmung möglich, aber meist keine Schreckreaktion.
AC-2	Über 0,5 mA Kurve b	Wahrnehmung und unwillkürliche Muskelkontraktionen wahrscheinlich, aber in der Regel keine schädlichen elektrophysiologische Wirkungen.
AC-3	Über Kurve b	Starke unwillkürliche Muskelkontraktionen. Schwierigkeiten beim Atmen. Reversibel Störungen der Herzfunktion. Immobilisierung kann auftreten. Die Auswirkungen nehmen mit der Stärke des Stroms zu. In der Regel sind keine organischen Schäden zu erwarten.
AC-4 ¹	Über Kurve c ₁	Es können pathophysiologische Wirkungen auftreten, wie z. B. Herzstillstand, Atemstillstand, und Verbrennungen oder andere zelluläre Schäden. Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern steigt mit Stromstärke und Zeit.
	c ₁ bis c ₂	AC-4.1 Wahrscheinlichkeit von Kammerflimmern steigt auf bis zu ca. 5 %
	c ₂ bis c ₃	AC-4.2 Wahrscheinlichkeit von Kammerflimmern bis zu ca. 50 %
	Über Kurve c ₃	Wahrscheinlichkeit von Kammerflimmern über 50 %

¹ Bei Stromflussdauern unter 200 ms wird das Kammerflimmern innerhalb der vulnerablen Periode nur dann ausgelöst, wenn die relevanten Schwellenwerte überschritten werden. Bezüglich des Kammerflimmerns bezieht sich dieser Wert auf die Auswirkungen des Stromes, der im Pfad linke Hand zu Fuß fließt.

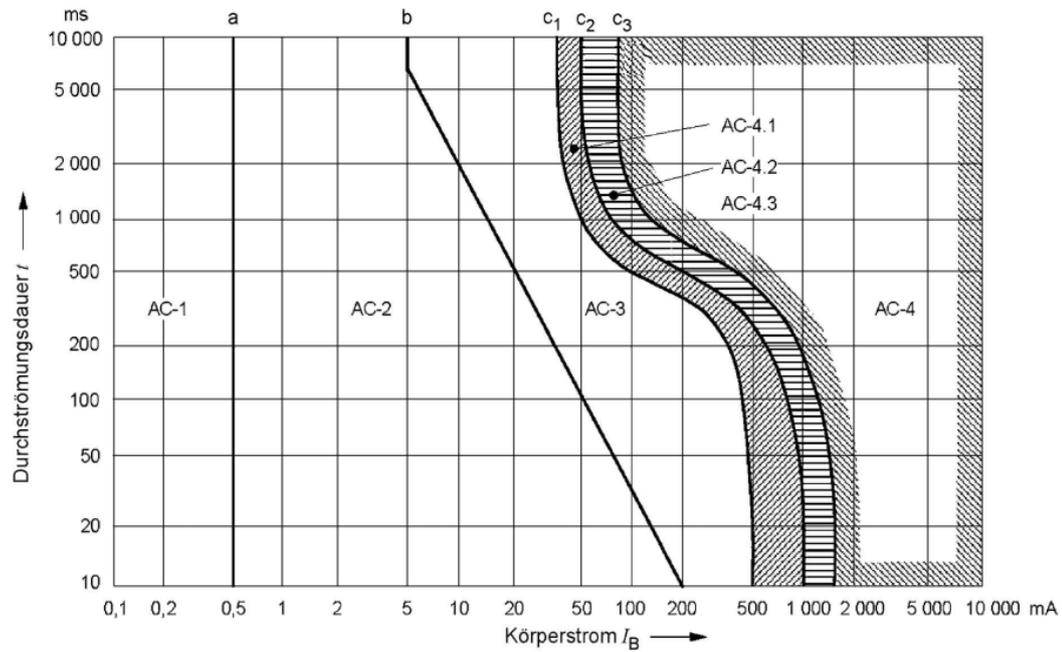


Abbildung 10: Konventionelle Zeit/Strom-Bereiche der Auswirkungen von Wechselströmen auf den menschlichen Körper bei Frequenzen von 15 Hz bis 100 Hz [11]

Um diesen Schutz so gut es geht zu gewährleisten kommt in Österreich das sogenannte dreistufige Schutzkonzept zum Einsatz. Die Gliederung dessen ist in Abbildung 11 dargestellt und beginnt mit dem Basisschutz, der für den normalen Betrieb zuständig ist und in Kapitel 2.4.1 diskutiert wird. Danach folgt der Fehlerschutz, der im Fehlerfall wirksam wird und in Kapitel 2.4.2 erläutert wird. Als letzte Instanz folgt der Zusatzschutz welcher in Kapitel 2.4.3 beschrieben wird.

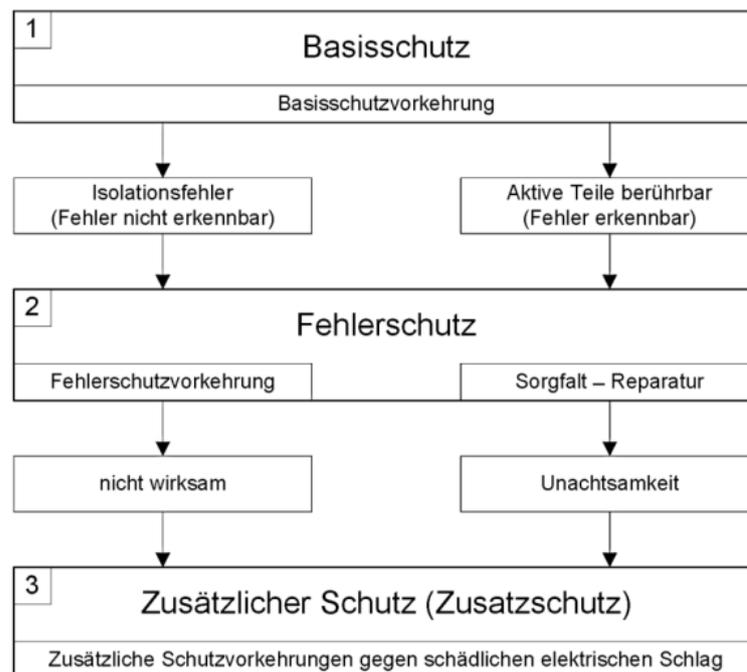


Abbildung 11: Dreistufiges Schutzkonzept in Österreich [8]



2.4.1 Basisschutz

Der Basisschutz bietet den Schutz gegen direktes Berühren von aktiven Teilen.

Eine einfache Form des Basisschutzes stellt zB eine Basisisolierung des Leiters oder der leitfähigen Teile dar, welche mit Isolierungen oder Abdeckungen realisiert werden können. In abgeschlossenen Betriebsstätten, welche nur für befugtes Personal zugänglich sind, kann teilweise auf den Basisschutz verzichtet werden. Für alle anderen elektrischen Betriebsmittel oder elektrischen Anlagen gilt jedoch, dass die Basisisolierung oder Abdeckung nur durch Zerstörung oder mittels fachmännischem Werkzeug entfernt werden kann. In machen Situation reicht jedoch auch eine weite Distanz zum aktiven Leiter, die ohne Hilfsmittel nicht überbrückt werden kann, dies ist zB bei Freileitungen der Fall. [8]

Für eine genauere Kategorisierung kommen vier Schutzklassen im Basisschutz zum Einsatz: Schutzklasse 0 bis III.

Geräte bzw. Betriebsmittel der Schutzklasse 0 weisen dabei nur eine Basisisolierung auf und besitzen keinen Schutzleiteranschluss und sind in Österreich und vielen anderen Ländern seit Jahren verboten.

Schutzklasse I weisen eine einfache Basisisolierung auf und alle berührbaren metallischen Gehäuse sind mit einem Schutzleiter verbunden. Erkennbar sind solche Geräte an einem Typ-F-Stecker, dem sogenannten Schukostecker (Schutzkontaktstecker).

In der Schutzklasse II befinden sich alle Geräte, die ergänzend zur Basisisolierung eine entweder verstärkte oder eine zweite Isolierung. Diese Geräte werden mit zwei Rechtecken ineinander als Symbol gekennzeichnet und weisen als Merkmal Typ-C-Stecker ohne Schutzkontakt auf.

Als letzte Schutzklasse ist noch die Schutzklasse III zu erwähnen, wo als Schutzmaßnahme Schutzkleinspannung eingesetzt wird. Unter Schutzkleinspannung fallen Wechselspannungen unter 50 V und Gleichspannungen unter 120 V. Unter dieser Spannungsgrenze ist das Risiko einer Auswirkung auf den menschlichen oder tierischen Körper so gering, dass diese vernachlässigt werden kann. [10, 12]

2.4.2 Fehlerschutz

Im Gegensatz zum Basisschutz kommt der Fehlerschutz in elektrische Anlagen im Fehlerfall zum Einsatz und soll auch im Fehlerfall das Auftreten gefährlicher Berührungsspannungen entsprechend verhindern. Der Fehlerschutz wird auch als Schutz gegen indirektes Berühren von aktiven Teilen bezeichnet, wird durch Schutzgeräte oder zusätzliche Schutzisolierung realisiert und unterteilt sich in die beiden Kategorien: [8, 9, 10, 12]

- mit PE-Leiter und
- ohne PE-Leiter.

Ohne PE-Leiter kommen folgende drei Möglichkeiten zum Einsatz:

- Schutzisolierung
- Schutzkleinspannung
- Schutztrennung: Hier muss darauf geachtet werden, dass bei mehreren Betriebsmitteln ein gemeinsamer Potentialausgleich vorhanden ist.

Beim Fehlerschutz mit PE-Leiter ist zu beachten, dass für jedes Netzsystem (wie in Kapitel 2.3 beschrieben) ein anderer Fehlerschutz zum Einsatz kommt.

- Fehlerstromschutzeinrichtung: Kommt in einem TT-System zum Einsatz.
- Nullung: Am häufigsten im Einsatz und kommt im TN-System zum Einsatz.
- Schutzerdung: Technisch überholt und kommt nicht mehr zum Einsatz.
- Isolationsüberwachungssystem: Kommt in einem IT-Netz zum Einsatz.

2.4.3 Zusatzschutz

Der Zusatzschutz ist die letzte Instanz, wenn alle beiden übergeordneten Schutzmaßnahmen nicht funktioniert haben. Dabei hat sich in Österreich eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung mit einem Differenzfehlerstrom $I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$ durchgesetzt, siehe dazu Kapitel 2.5. [8]

2.5 Fehlerstromschutzeinrichtung

Die geläufigste Fehlerstromschutzeinrichtung ist ein Fehlerstromschutzschalter (FI, englisch Residual Current Device, RCD). Ein FI beruht auf dem ersten Kirchhoffschen Gesetz und bildet den Summenstrom aller stromdurchflossenen Leiter. Falls ein Fehler im System auftritt und ein Fehlerstrom gegen Erde abfließt, ergibt die Summe der Ströme nicht mehr null und das Gerät schaltet ab. In Abbildung 12 ist der prinzipielle Aufbau eines vierpoligen FIs dargestellt. Dabei wird die Summe der Ströme mittels der induzierten Spannung in eine Spule gebildet und ab einem gewissen Stromwert (in Abbildung 12 $I_{\Delta} > 0,5 \cdot I_{\Delta n}$) ausgelöst. [13]

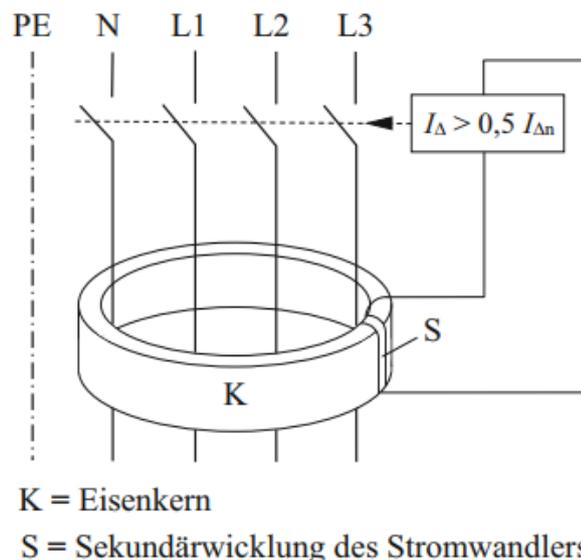


Abbildung 12: Schematischer Aufbau eines Fehlerstromschutzgerätes [13]



Bei verschiedenen Anwendungsfällen kommen entsprechend unterschiedliche Fehlerstromschutzschalter zum Einsatz. Dabei gibt es grundsätzlich u.a. folgende Charakteristika:

- Bauart
- Bemessungswerte
- Anzahl der Pole
- Differenzfehlerstrom
- Typ

Sämtliche FIs sind demnach vom prinzipiellen Aufbau her ident, jedoch erfüllen sie mit zusätzlichen Bauteilen verschiedene Auslösekriterien und Stromwerte und sind für verschiedene Stromformen geeignet. In Tabelle 3 sind die unterschiedlichen Stromformen und die zugehörigen Typen von FIs zusammengefasst. Gemäß OVE E 8101:2019-01-01 [8] ist ein Bemessungsfehlerstrom $I_{\Delta n}$ von 30 mA für den Personenschutz vorgeschrieben. Der Typ B wird beispielweise in Industrieanlagen vorgesehen, bei Haushalten ist aktuell kein dezidierter Typ vorgeschrieben jedoch empfiehlt es sich aufgrund der steigenden Elektronikkomponenten den Typ A zu verwenden. Aufgrund der erhöhten Installation von Elektroladestationen gibt es bereits einen eigenen FI vom Typ EV der die speziellen Anforderungen laut IEC 62955 [14] erfüllt. Dieser Typ erfüllt die gleichen Kriterien wie ein Typ B FI kann jedoch auch Mischfrequenzen, die beim Laden von Elektrofahrzeug entstehen können, erkennen. Weiters ist aufgrund der unverzögerten Auslösung einer herkömmlichen FI-Schutzeinrichtung die Selektivität von hintereinander geschalteten FIs nicht möglich daher gibt es bei der Reihenschaltung von FI-Schutzschaltern neben der üblichen Bauform (ohne Kennzeichnung) noch kurzzeitverzögerte Geräte (gekennzeichnet mit G) und selektive zeitverzögerte Geräte (gekennzeichnet mit S). Gemäß OVE E 8101 i.d.g.F. [8]. muss ein FI gegen Kurzschluss und Überlast abgesichert werden. Daher gibt es vorsicherungsfeste und nicht vorsicherungsfeste FIs die den Nennwert der vorgelagerten Sicherung einschränken. Ein vorsicherungsfester FI mit einem Bemessungsstrom von 40 A darf demnach mit einer 40 A Sicherung vorgesichert werden. Ein nicht vorsicherungsfester FI mit einem Bemessungsstrom von 40 A darf hingegen nur mit maximal einer 25 A Sicherung vorgesichert werden (Bemessungsstrom der Vorsicherung gleich dem Bemessungsstrom des FIs dividiert durch den Faktor $1,6^2$). Weiters gibt es noch FIs mit eingebauten Überstromauslöser, wo ein Leitungsschutzschalter integriert ist. [10]

² Der Faktor 1,6 gilt für Schmelzsicherungen, für LSS gilt ein Faktor von 1,45 gemäß [8, 9]

Tabelle 3: Typen und Stromformen von Fehlerstromschutzgeräten [13]

Stromart	Stromform	ordnungsgemäße Funktion				Auslösestrom
		AC 	A 	B 	/ B+ 	
Wechselfehlerstrom		•	•	•	•	0,5 bis 1,0 $I_{\Delta n}$
Pulsierende Gleichfehlerströme (pos. oder neg. Halbwellen)		-	•	•	•	0,35 bis 1,4 $I_{\Delta n}$
angeschnittene Halbwellenströme Anschnittwinkel 90°el Anschnittwinkel 135°el		-	•	•	•	Anschnittwinkel 90°: 0,25 bis 1,4 $I_{\Delta n}$ Anschnittwinkel 135°: 0,11 bis 1,4 $I_{\Delta n}$
Halbwellenstrom bei Überlagerung mit glattem Gleichstrom von 6 mA		-	•	•	•	max. 1,4 $I_{\Delta n}$ + 6 mA
glatter Gleichstrom		-	-	•	•	0,5 bis 2,0 $I_{\Delta n}$

2.6 Überstrom-Schutzeinrichtungen

Die Überstrom-Schutzeinrichtungen sorgen dafür, dass eine Erwärmung des Systems, aufgrund einer längeren Überlastung der Betriebsmittel, die thermischen Grenzen nicht erreicht. Diese müssen sämtliche Leiter umfassen und dürfen dabei allerdings den Schutzleiter, den PEN-Leiter oder den Potentialausgleichsleiter auf keinen Fall unterbrechen. Im nachfolgenden Kapitel werden die wichtigsten Überstrom-Schutzeinrichtungen beschrieben, welche für den Labordemonstrator, welcher im Zuge dieser Masterarbeit entwickelt wird, verwendet werden. [15]

2.6.1 Sicherungslasttrennschalter

Der Sicherungslasttrennschalter ist ein Lasttrennschalter mit Sicherungseinsatz. Er erfüllt die Bedingung einer offenen Trennstelle, kann auch unter Last geschaltet werden und findet Verwendung in der Mittel- und Niederspannung. Als Sicherungsmedium kommen Schmelzsicherungen zum Einsatz die in die Trennstelle gesteckt werden und mit einem Hebel wieder herausgenommen werden können. Ein Kurzschlussstrom oder Überlaststrom führt ab einer gewissen Dauer zu einem Durchschmelzen der Sicherung, daher sind Schmelzsicherungen für einmaliges Ausschalten geeignet und müssen danach ersetzt werden. Dabei wird zwischen NH-Sicherungseinsätzen (Niederspannung-Hochleistungssicherungen) und dem D0-System unterschieden. Weitere, häufig verwendete Begriffe für das D0-System sind DIAZED (D-System, veraltet) und NEOZED (D0-System, aktuell). DIAZED und NEOZED sind eingetragene Warenzeichen der Firma Siemens. [6]

Gemäß ÖVE/ÖNORM EN 60269-1:2015-06-01 [16] werden Schmelzsicherungen mit zwei Buchstaben charakterisiert. An erster Stelle befindet sich entweder ein g für Ganzbereichssicherung oder ein A für Teilbereichssicherung. Dabei bedeutet Ganzbereich, dass die Sicherung ihren Bemessungsstrom führen kann, ohne zu Schmelzen und die Ströme, die über dem Bemessungsstrom liegen, bis hin zum Bemessungsausschaltvermögen abschalten kann. Eine Teilbereichssicherung unterscheidet sich hinsichtlich des



Bemessungsstrom nicht, kann jedoch nur ein Vielfaches ihres Bemessungsstromes abschalten.

Der zweite Buchstabe beschreibt die Betriebsklasse und damit die Zeit-Strom-Kennlinie. Dabei gibt es mehrere Anwendungsfälle:

- G – zum Schutz für allgemeine Anwendung
- M – für den Schutz von Motorstromkreisen
- R – zum Schutz von Halbleiter-Bauelementen
- Tr – Transformatorenschutz
- B – Bergbauanlagenschutz
- S – Halbleiter-, Kabel- und Leitungsschutz

In den meisten Fällen wird eine Sicherung vom Typ gG verwendet, die weiteren Typen sind der Vollständigkeit halber aufgezählt. [13]

Der Bemessungsstrom ist jener Strom, mit dem die Schmelzsicherung dauerhaft belastet werden kann, ohne auszulösen. Tabelle 4 gibt einen Überblick der unteren Auslösezeiten mit den zugehörigen Stromwerten. I_{nf} ist der kleine Prüfstrom und bedeutet, dass eine Abschmelzung der Sicherung nicht auftreten darf. I_f ist der große Prüfstrom, bei dem eine Abschmelzung erfolgen muss.

Tabelle 4: Auslösezeiten und Prüfströme für gG Sicherungseinsätze aus [16]

Bemessungsstrom I_n bei „gG“ Kennlinienstrom I_{ch} bei „gM“ ^{a,b}	Konventionelle Prüfdauer h	Prüfstrom	
		I_{nf}	I_f
$I_n < 16$	1	^a	^a
$16 \leq I_n \leq 63$	1		
$63 < I_n \leq 160$	2		
$160 < I_n \leq 400$	3	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$
$400 < I_n$	4		

^a Die Werte für Sicherungseinsätze mit einem Bemessungsstrom von weniger als 16 A sind in den Folgeteilen angegeben.
^b Zu „gM“-Sicherungseinsätzen siehe 5.7.1.

Die Kenngrößen und damit verbundenen Auslösekennlinien sind gemäß ÖVE/ÖNORM EN 60269-1 [16] vorgegeben und deren Bemessungsströme werden folgendermaßen abgestuft:

1250 A, 1000 A, 800 A, 630 A, 500 A, 400 A, 315 A, 250 A, 200 A, 160 A, 125 A, 100 A, 80 A, 63 A, 50 A, 40 A, 35 A, 32 A, 25 A, 20 A, 16 A, 12 A, 10 A, 8 A, 6 A, 4 A, 2 A

2.6.2 Leitungsschutzschalter

Der Leitungsschutzschalter (LSS) dient zum Schutz einer Leitung im Bereich der Überlast und eines Kurzschlusses. Im Englischen wird er als Miniature Circuit Breaker (MCB) bezeichnet,

daraus lässt sich auch schließen das dieses Schutzgerät mit dem Leistungsschalter verwandt ist. Dies erkennt man an den beiden verbauten Auslösern (thermisch und magnetisch) und der ähnlichen Kennlinie (siehe Kapitel 2.6.3.).

Abbildung 13 zeigt die Kennlinien und Nennauslöseströme der verschiedenen Typen von LSS. Im ersten Bereich (Überlastbereich) löst das Thermo-Bimetall ab einer gewissen Thermischen Erwärmung aus, daraus ergibt sich der exponentielle Verlauf zu Beginn der Kennlinie. Die verschiedenen LSS-Typen haben auf den thermischen Bereich keinen Einfluss, dieser spielt erst beim magnetischen Auslöser eine Rolle. Dabei wird der Knick der Kennlinie durch das x-Fache des Bemessungsstromes vorgegeben. Der Typ D löst zB bei einem Strom von $20 \cdot I_n$ in unter 0,1 s aus, weshalb dieser Typ nur für Anlagen mit Motoren und deren hohen Anlaufströme geeignet ist.

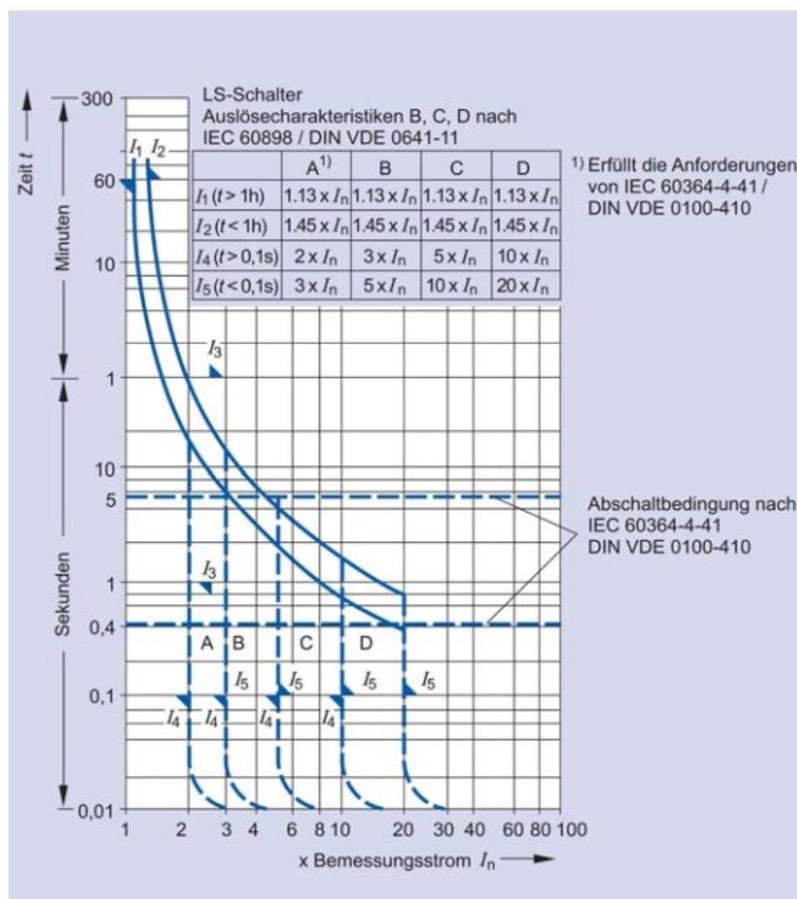


Abbildung 13: Kennlinie von Leitungsschutzschalter-Typen [15]

2.6.3 Leistungsschalter

In der Vergangenheit fanden Leistungsschalter (LS) hauptsächlich in der Mittel- und Hochspannungstechnik ihren Einsatz. Aufgrund der steigenden Anforderungen an intelligente Schutzsysteme findet der LS immer mehr Einzug in die Niederspannung. In diesem Kapitel wird auf die Niederspannungsleistungsschalter und deren Besonderheiten eingegangen.

2.6.3.1 Einsatzorte / Arten

Aktuell finden Niederspannungsleistungsschalter, entweder in offener oder in geschlossener Bauform, hauptsächlich in der Industrie und Automatisierungstechnik ihren Einsatz. Aufgrund

der aktuellen Herausforderungen (wie in Kapitel 2.7 erläutert) könnten Leistungsschalter jedoch bald Verwendung im Niederspannungsnetz finden. Eine weitere Besonderheit der Niederspannungs-LS ist die Einbauart. Dabei wird unterschieden zwischen Festeinbau (fix bspw. auf einer Montageplatte verbaut), Sockelmontage (steckbar, einfache Trennung des LS bzw. Austausch dessen durch Stecktechnik möglich), oder einer Einschubeinrichtung (herausziehbar, Leistungsschalter zusätzlich noch verriegelt). Abbildung 14 zeigt beispielhaft drei unterschiedlichen Einbauarten eines LS. [17]



Abbildung 14: Einbauarten von Niederspannungsleistungsschaltern [7]

2.6.3.2 Kenngrößen

Die Konfiguration eines Niederspannungsleistungsschalters ist abhängig von seinem Einsatzbereich wonach sich viele verschiedene Kenngrößen, welche in diesem Kapitel erläutert werden, ergeben.

Die beiden wichtigsten Größen sind Spannung und Strom des LS. Als Spannung ist die Bemessungsbetriebsspannung U_e wichtig welche angibt, bis zu welcher Spannung der LS betrieben werden kann. Für den Strom gibt es mehrere wichtige Kenngrößen. Dabei gibt der Bemessungsstrom I_n den maximalen Betriebsstrom des LS an. Ebenso zählt das Bemessungs-Grenzkurzschlussausschaltvermögen I_{cu} zu den Stromwerten und gibt an, wie hoch der maximale Kurzschlussstrom sein darf, um ein erfolgreiches Abschalten noch zu ermöglichen. Das erfolgreiche Abschalten eines LS ist abhängig von der Leistung, die im Schalter umgesetzt wird und daher ist I_{cu} immer in Abhängigkeit von U_e angegeben. Weiters ist die Anzahl an geschalteten Polen eine Kenngröße, je nach eingesetztem System nach Art der Erdverbindung (siehe auch Kapitel 2.3) gibt es eine unterschiedliche Anzahl von geforderten schaltbaren Polen. Im Wesentlichen werden Leistungsschalter ein-, drei- und vierpolig angeboten. Einpolige bringen den Vorteil mit sich, dass im Fehlerfall einzelne Phasen separat weiter betrieben werden können, drei- bzw. vierpolige Ausführungen schalten hingegen die gesamte Anlage ab und ermöglichen eine allpolige Trennung. [17]

Je nach Komplexität des Anwendungsfalles kann zwischen zwei Schutzfunktionen gewählt werden. Für einfachere und kostengünstigerer Anlagen kann der simpel aufgebaute



thermomagnetische Auslöser verwendet werden. Diese Art von LS ist vom Aufbau ident wie ein LSS (siehe Kapitel 2.6.2), der Unterschied besteht lediglich im erhöhten Kurzschlussausschaltvermögen.

Für mehr Flexibilität in der Veränderung der Auslösekennlinie gibt es einen elektronischen Auslöser welcher durch Strommessung in den einzelnen Phasen sowie dem Neutralleiter und einem Magnetauslöser den LS zum Auslösen bringt, die daraus resultierende Kennlinie wird im nachfolgenden Kapitel erläutert. Der elektronische Auslöser ermöglicht eine Kommunikationsfähigkeit des LS und damit das Auslesen der Messwerte auch für von der Schutzfunktionalität unabhängige Anwendungen. [7]

2.6.4 Einstellbereiche

Je nach Konfiguration ist die Auslösekennlinie des Leistungsschalters in unterschiedliche Stufen unterteilt. Der thermisch-magnetische Überstromauslöser (TM) ist in Abbildung 15 im linken Bereich dargestellt, durch die Hardware des LS vorgegeben und kann mittels softwarebasierter Konfiguration nicht verändert werden. Wie zu erkennen ist, unterscheidet sich die Kennlinie nicht von jener eines LSS. Bei diesem Auslöser ergeben sich daher zwei Schutzbereiche, wobei L (Long Time Delay) und I (Instantaneous) als Abkürzungen verwendet werden. Mit einem elektronischen Überstromauslöser ist die Kennlinie entsprechend variabler und granularer konfigurierbar woraus sich die Kennlinie in der rechten Teilabbildung ergibt. Aufgrund der entsprechenden Einstellmöglichkeiten mittels zugehöriger Softwarepakete ist dieser Auslösertyp hinsichtlich erhöhter Flexibilität und Erweiterbarkeit der Anlage besser geeignet. Der Bereich ② der Kennlinie kennzeichnet den Stromeinstellwert des Überlastauslösers. Die Steigung im Bereich ③ ist abhängig von der Auslösezeit des L-Schutzes, bei Verlängerung der Geraden schneidet dieser Wert die eingestellte Auslösezeit. Bereich ⑤ spiegelt das thermische Gedächtnis des LS wider und kann deaktiviert werden, dann ergibt sich Bereich ④ und ⑥. Bereich ① ist in beiden Kennlinien gleich und beschreibt den unverzögerten Kurzschlussstrombereich wo der LS im Falle eines Kurzschlusses mit der schnellstmöglichen Ausschaltzeit abschaltet. Bei diesem Auslöser befindet sich ein zusätzlicher Bereich welcher mit S (Short Time Delay) abgekürzt wird zwischen den beiden Zonen L und I. [7, 17]

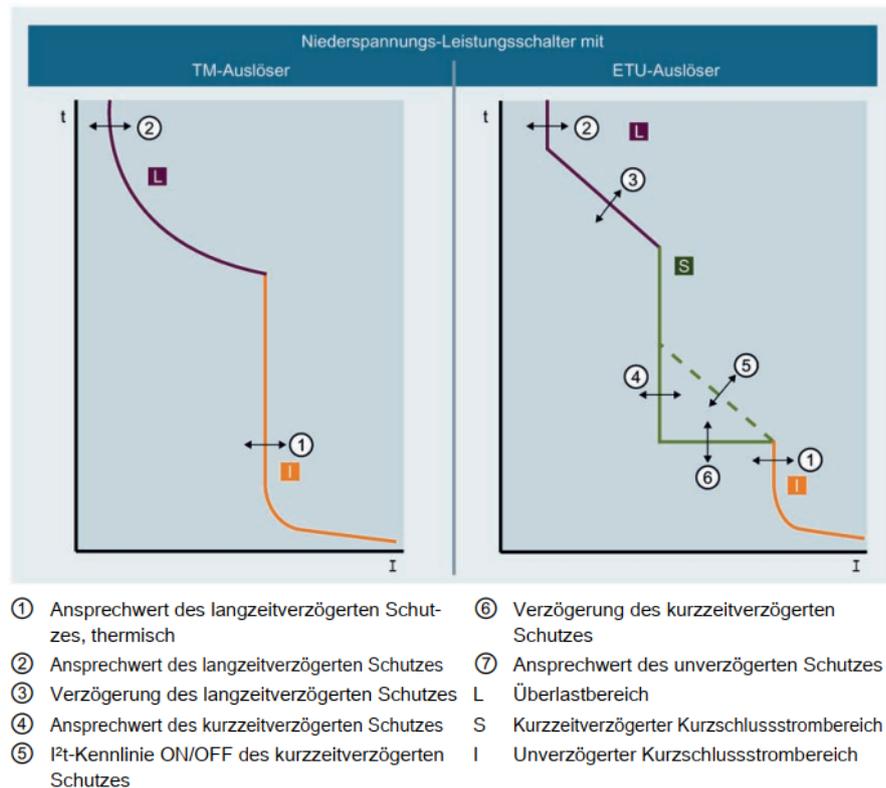


Abbildung 15: Kennlinie unterschiedlicher Auslöser von Niederspannungsleistungsschaltern [7]

2.7 Automatisierte Rekonfiguration im Niederspannungsnetz

Wie in Kapitel 2.1 erwähnt kommt im Niederspannungsbereich vermehrt das Strahlennetz zum Einsatz. Teilweise ist dieses Strahlennetz redundant ausgeführt mit doppelten Leitungen oder offenen Trennstellen, dies allerdings typischerweise eher in urbanen Gebieten. Durch die Zunahme an elektrischen Verbrauchern und dezentralen Erzeugern stößt diese einfache Netztopologie an ihre Grenzen weshalb es entsprechender Lösungsansätze, beispielsweise temporärer Trennstellenverlegung oder temporärer Vermaschung bedarf, sodass Überlastungen einzelner Bereiche verhindert werden können. Dieses Thema wird unter anderem in [18] und im Forschungsprojekt PoSyCo [19] behandelt, siehe auch [3]. Im Zuge dieses Kapitels werden diese Ansätze entsprechend näher betrachtet.

Netzrekonfiguration bedeutet generell, dass die Struktur bzw. die Topologie geändert wird. Damit diese Netzrekonfiguration automatisiert und während des Betriebes stattfinden kann kommen intelligente Schutzsysteme zum Einsatz. Diese intelligenten Schutzsysteme messen die aktuellen Strom- und Spannungswerte und können mit Hilfe derer feststellen ob Bereiche im Netz überlastet sind. Mit Hilfe eines Algorithmus kann die ideale Netzkonfiguration und die damit verbundene Schalterstellung ermittelt werden, sodass die tatsächlichen Schalter im Netz geschaltet werden, um dadurch eine Entlastung des überlasteten Bereiches zu erreichen. Dabei kann der Algorithmus die idealen Schalterstellungen nach gewissen Kriterien reihen wie zB nach den geringsten Verlusten.

Durch solche innovativen Schutzsysteme evolutioniert sich das konventionelle Niederspannungsnetz hin zu einem Smart Grid. Mithilfe dieser Schutzsysteme kann eine



automatisierte Netzrekonfiguration jederzeit stattfinden sodass beispielsweise immer der Zustand mit den geringsten Verlusten im System eingestellt werden kann.

Damit der Algorithmus das tatsächlich vorhandene Netz berücksichtigen kann werden mit Hilfe der Software DIgSILENT PowerFactory alle Leitungen, Verbraucher, Erzeuger und Schalter abgebildet und durch entsprechende Simulationen (Lastflussrechnungen) die auftretenden Größen wie zB Ströme, Spannungen sowie Leistungen für alle Variationen an Schalterstellungen ermittelt.

2.8 Gesetzliche und normative Grundlagen bei der Entwicklung und dem Aufbau von Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen

Gemäß ETG 1992 (Elektrotechnikgesetz) [20] müssen in der Elektrotechnik neu errichtete elektrische Anlagen und elektrische Betriebsmittel in technischer Hinsicht die Grundsätze der Normalisierung und Typisierung so weit wie möglich einhalten. Diese technischen Grundsätze sind in verschiedenen Normen zu finden. Dabei werden verbindliche bzw. kundgemachte Normen ernannt die Gesetzescharakter aufweisen und daher verpflichtend anzuwenden sind. Als Beispiel befinden sich die verpflichtenden Grundsätze in Bezug auf Planung, Errichtung und Prüfung von elektrischen Niederspannungsanlagen in der OVE E 8101:2019-01-01 [8] (kundgemachte Norm).

Aufbauend auf das ETG folgen zwei Verordnungen, welche weitere Richtlinien in Bezug des Arbeitens mit elektrischem Strom vorgeben: Die ESV 2012 (Elektroschutzverordnung 2012) [21] schreibt dabei den Schutz der ArbeitnehmerInnen vor Gefahren durch den elektrischen Strom vor und die ETV 2020 (Elektrotechnikverordnung 2020) [22] enthält alle Normen, die bei Maßnahmen im Bereich des Gefährdungs- sowie Störungsbereichs von elektrischen Anlagen und elektrischen Betriebsmitteln verbindlich sind.

Als wesentlichstes technisches Regelwerk ist für den Bau eines Verteilers die ÖVE/ÖNORM EN 61439-1 i.d.g.F. (Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen) [23] heranzuziehen. Weiter wichtige normative Dokumente werden in diesem Kapitel ebenso erwähnt.

2.8.1 Allgemeines

Grundsätzlich gilt es bei einem Laboraufbau sämtliche relevante Gesetze und Normen einzuhalten, jedoch kann unter gewissen Kriterien eine Ausnahme der Richtlinien für spezifische Anwendungsfälle und Versuchsszenarien getroffen werden. Oberstes Ziel dabei ist trotz allem die Sicherheit bzw. der Schutz gegen elektrischen Schlag der Anwender*innen.

Beim Betrieb ist auf jeden Fall zu beachten, dass der versorgende Stromkreis (CEE-Steckdose, Transformator, etc.) entsprechende Schutzmaßnahmen aufweist. Ein Beispiel dazu wäre die Versorgung des Verteilers über einen CEE-32-A-Abgang aus einem TN-C-S-System samt ergänzendem Fehlerstromschutzschalter als Zusatzschutz ($I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$).



2.8.2 Bemessungswerte von Schnittstellen

An der Schnittstelle der Niederspannungs-Schaltgerätekombination mit dem elektrischen Netz müssen gewisse Bemessungswerte übereinstimmen bzw. dürfen diese nicht unterschritten oder in manchen Fällen überschritten werden. In der nachfolgenden Tabelle 5 gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61439-1 i.d.g.F. [23] sind die wichtigsten Werte zusammengefasst.

Tabelle 5: Bemessungswerte [23]

Bemessungsspannung der Schaltgerätekombination U_n	\geq Nennspannung des elektrischen Netzes
Bemessungsbetriebsspannung eines Stromkreises U_e	\geq Nennspannung des elektrischen Netzes
Bemessungsisolationsspannung ³ eines Stromkreises U_i	\geq der angegebenen Werte für U_e und U_n des jeweiligen Stromkreises
Bemessungsstoßspannungsfestigkeit der Schaltgerätekombination U_{imp}	\geq der vorgegebenen transiente Überspannung des Netzes
Bemessungsstrom der Schaltgerätekombination ⁴ I_{nA}	Eine Erwärmung der einzelnen Betriebsmittel aufgrund des Stromes darf die Grenzwerte aus Tabelle 6 nicht überschreiten Es dürfen keine Schäden durch Erwärmung auftreten
Bemessungsstrom eines Stromkreises I_{nc}	Eine Erwärmung der einzelnen Betriebsmittel aufgrund des Stromes darf die Grenzwerte aus Tabelle 6 nicht überschreiten Es dürfen keine Schäden durch Erwärmung auftreten
Bemessungsstoßstromfestigkeit I_{pk}	\geq Scheitelwert des Stoßstromes des elektrischen Netzes
Bemessungskurzzeitstromfestigkeit eines Stromkreises I_{cw}	\geq Effektivwert des Kurzschlussstromes des elektrischen Netzes
Bedingter Bemessungskurzschlussstrom einer Schaltgerätekombination I_{cc}	\geq Effektivwert des Kurzschlussstromes des elektrischen Netzes. Zeitlich durch die übergeordnete KS-Schutzeinrichtung begrenzt
Bemessungsbelastungsfaktor ⁵ (RDF)	$I_{nc} \cdot RDF \geq$ angenommene Belastung der Abgänge
Bemessungsfrequenz f_n	= der Frequenz des elektrischen Netzes. Toleranz 98 % bis 102 %

³ Die Bemessungsisolationsspannung gibt an, wie hoch die Prüfspannung bis zum Überschlag der Kriechstrecke sein muss.

⁴ Der Bemessungsstrom der Schaltgerätekombination ist der kleinere der beiden folgenden Ströme: Gesamtstrom der Hauptsammelschiene oder Summe der Ströme der parallelen Einspeisungen der Schaltgerätekombination.

⁵ Der RDF (en. Rated Diversity Factor) gibt den Prozentwert des Bemessungsstroms, bei dem keine gegenseitige thermische Belastung durch den Strom der einzelnen Betriebsmittel geschieht, an und gilt für den Fall, dass alle Abgänge belastet sind.



„Die folgenden kennzeichnenden Merkmale müssen angegeben werden:

- a) *zusätzliche Anforderungen abhängig von den besonderen Betriebsbedingungen einer Funktionseinheit (z. B. Art der Koordination, Überlasteigenschaften);*
- b) *der Verschmutzungsgrad [...];*
- c) *die Systeme nach Art der Erdverbindung, für das die Schaltgerätekombination vorgesehen ist;*
- d) *die Innenraum- und/oder Freiluftaufstellung [...];*
- e) *ortsfest oder ortsveränderbar [...];*
- f) *die Schutzart;*
- g) *vorgesehen für die Verwendung durch Elektrofachkräfte oder Laien [...];*
- h) *die Einteilung nach Elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) [...];*
- i) *besondere Betriebsbedingungen, falls zutreffend [...];*
- j) *die äußere Bauform [...];*
- k) *Schutz gegen mechanische Einwirkung, sofern anwendbar [...];*
- l) *die Art des Aufbaus – Einsätze oder herausnehmbare Teile [...];*
- m) *die Art der Kurzschluss-Schutzeinrichtung(en) [...]*
- n) *Maßnahmen zum Schutz gegen elektrischen Schlag;*
- o) *Gesamtmaße (einschließlich vorstehender Teile, z. B. Griffe, Verkleidungen, Türen), sofern erforderlich;*
- p) *die Masse, sofern erforderlich.“ [23]*

2.8.3 Umgebungsbedingungen

In der nachfolgenden Tabelle 6 sind die Grenzwerte für die Umgebungsbedingungen gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61439-1 i.d.g.F. [23] zusammengestellt. Falls es zu einer Verletzung dieser Bedingungen beim Transport, der Lagerung oder der Aufstellung kommt, müssen erforderliche Maßnahmen vom Hersteller angegeben werden.

Tabelle 6: Grenzwerte für Umgebungsbedingungen [23]

Umgebungstemperatur im Innenbereich	+40 °C bis -5 °C, jedoch im Mittelwert über 24 Stunden nicht über 35 °C.
Umgebungstemperatur im Freiluftbereich	+40 °C bis -25 °C, jedoch im Mittelwert über 24 Stunden nicht über 35 °C.
Luftfeuchtigkeit im Innenbereich	Bei der maximalen Temperatur darf eine relative Luftfeuchtigkeit von 50 % nicht überschritten werden. Je geringer die Temperatur, umso höher darf die Luftfeuchtigkeit sein
Luftfeuchtigkeit im Freiluftbereich	Im Freien darf die relative Luftfeuchtigkeit auch vorübergehend 100 % betragen.
Höhenlage	< 2000 m. Ab dieser Grenze muss auf eine reduzierte Isolationsfestigkeit, geringeres Schaltvermögen und erhöhter Kühlwirkung geachtet werden.

Ähnlich wie bei den besonderen Merkmalen einer Schaltgerätekombination müssen dem Hersteller besondere Betriebsbedingungen vom Anlagenbetreiber übermittelt werden.



„Besondere Betriebsbedingungen schließen z. B. ein:

- a) Werte der Umgebungstemperatur, der relativen Luftfeuchte und/oder der Höhenlage, die von den in 7.1 festgelegten abweichen;
- b) Auftreten schneller Temperatur- und/oder Luftdruckänderungen, so dass mit einer außergewöhnlichen Betaung innerhalb der Schaltgerätekombination gerechnet werden muss;
- c) Atmosphäre, die einen wesentlichen Anteil an Staub, Rauch, korrosiven oder radioaktiven Bestandteilen, Dämpfen oder Salz enthalten kann;
- d) Einwirkung starker elektrischer oder magnetischer Felder;
- e) Einwirkung extremer klimatischer Bedingungen;
- f) Einwirkung von Pilzen oder Kleintieren;
- g) Aufstellung in feuer- oder explosionsgefährdeten Bereichen;
- h) Auftreten heftiger Erschütterungen, Stöße und seismischer Ereignisse;
- i) Aufstellung, bei der die Stromtragfähigkeit oder das Ausschaltvermögen beeinflusst wird, z. B. durch Einbau der Schaltgerätekombination in Maschinen oder Mauernischen;
- j) Einwirkung von leitungsgeführten und gestrahlten Störeinflüssen, außer elektromagnetischen, und von elektromagnetischen Störungen in anderen Umgebungen als in 9.4 beschrieben;
- k) außergewöhnliche Überspannungen oder Spannungsschwankungen;
- l) übermäßige Oberwellen in der Versorgungsspannung oder im Laststrom.“ [23]

2.8.4 Anforderungen beim Bau eines Verteilers

Im Allgemeinen müssen beim Verteilerbau Werkstoffe, die den mechanischen, thermischen und elektrischen Bedingungen standhalten, verwendet werden.

Folgende Punkte bzw. Anforderungen müssen gemäß [23] erfüllt bzw. überprüft werden:

- Korrosionsschutz
- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
- Kurzschlussfestigkeit
- Eigenschaften des Isolierstoffes
 - Thermische Stabilität
 - Beständigkeit gegen Wärme und Feuer
- UV-Beständigkeit (nur für Freiluftanlagen)
- Mechanische Festigkeit
- Schutzart des Gehäuses einer Schaltgerätekombination
 - Mechanische Einwirkung
 - Basisschutz
 - Gegen Eindringen von festen Fremdkörpern und Wasser (IP-Code gemäß ÖVE/ÖNORM EN 60529 [24], Schaltgerätekombinationen müssen mindestens IP2X für Innenanlagen und mindestens IPX3 für Freiluftanlagen aufweisen)
- Luft- und Kriechstrecken
- Fehlerschutz
 - Anforderungen an den Schutzleiter
- Kurzschlusschutz



- Bedienungs- und Instandhaltungsbedingungen
 - Anforderungen hinsichtlich der Bedienung durch Laien
 - Anforderungen hinsichtlich der Zugängigkeit für befugte Personen
- Einbau von Betriebsmitteln
- Wärmeabfuhr
- Anschlüsse für von außen eingeführter Leiter
- Mindestquerschnitt des Neutralleiters (bis 16 mm² Leiterquerschnitt muss der Neutralleiter den gleichen Querschnitt aufweisen)
- Mindestquerschnitt des Schutzleiters (darf nicht kleiner als der Querschnitt des Neutralleiters sein)

2.8.5 Normative Dokumente

In diesem Kapitel werden alle weiteren Normen, die in Bezug auf die Errichtung von Niederspannungs-Schaltgerätekombination berücksichtigt werden müssen, aufgelistet wobei zwischen Regelwerken für die Herstellung eines Betriebsmittels samt dessen wichtigen Kenngrößen und Normen zur Auswahl der Komponenten unterschieden wird

- ÖVE/ÖNORM EN 60073 Grund- und Sicherheitsregeln für die Mensch-Maschine-Schnittstelle, Kennzeichnung – Codierungsgrundsätze für Anzeigegeräte und Bedienteile [25]

Diese Norm beinhaltet alle Informationen welche Farben zum Signalisieren eines Zustandes bzw. zum Ändern des Schaltzustandes verwendet werden dürfen.

- ÖVE/ÖNORM EN 60269-1 Niederspannungssicherungen Teil 1 Allgemeine Anforderungen [16]

Sicherungen und deren Einsatzbereiche sowie die entsprechenden Betriebsbedingungen werden in dieser Norm näher erläutert.

- ÖVE/ÖNORM EN 50274 Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen – Schutz gegen elektrischen Schlag – Schutz gegen unabsichtliches direktes Berühren gefährlicher aktiver Teile [26]

Diese Norm beschreibt, welche Abstände bei Betätigungselementen eingehalten werden müssen.

- ÖVE/ÖNORM EN 60947-1 Niederspannungsschaltgeräte Teil 1: Allgemeine Festlegung [27]

Zweck dieser Norm ist es, allgemeine Anforderungen und Prüfungen für Niederspannungsschaltgeräte zu vereinheitlichen.

- ÖVE/ÖNORM EN 62208 Leergehäuse für Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen – Allgemeine Anforderungen“ [28]

Diese Norm gibt an, welche Angaben und Nachweise vom Hersteller des Leergehäuses zur Verfügung gestellt werden müssen.



- OVE EN 60947-2 Niederspannungsschaltgeräte Teil 2: Leistungsschalter“ [17]

Sowohl Richtlinien, die beim Bau und bei der Prüfung von Niederspannungsleistungsschaltern eingehalten werden müssen, als auch deren kennzeichnende Merkmale werden in dieser Norm aufgezählt.

- OVE EN 60898-1 Elektrisches Installationsmaterial – Leitungsschutzschalter für Hausinstallationen und ähnliche Zwecke Teil 1: Leitungsschutzschalter für Wechselstrom (AC)“ [29]

Die Einteilung der Leitungsschutzschalter nach gewissen Kriterien sowie die charakteristischen Eigenschaften sind Bestand dieser Norm

- DIN IEC/TS 60479-1 Wirkungen des elektrischen Stromes auf Mensch und Nutztiere - Teil 1: Allgemeine Aspekte [11]

Diese Norm gibt jene Grenzwerte für Ströme an, die den Menschen für eine gewisse Zeit durchfließen dürfen (siehe auch Kapitel 2.4.).

3 Methoden

In diesem Kapitel wird die Projektierung des Labordemonstrators sowie die verwendeten Einbauten mit deren Besonderheiten näher erläutert.

3.1 Planung des Laboraufbaues

Der geometrische Entwurf wurde mit Autodesk AutoCAD 2021 erstellt und wird in diesem Kapitel ausführlicher beschrieben. Zu Beginn der Projektierung des Labordemonstrators wurde ein grundsätzliches Konzept in Form eines einphasigen Schemas entworfen um den Umfang sowie die Kostenstruktur für den Aufbau festlegen zu können. Das erste, dahingehend entworfene Übersichtsschema ist in Abbildung 16 dargestellt.

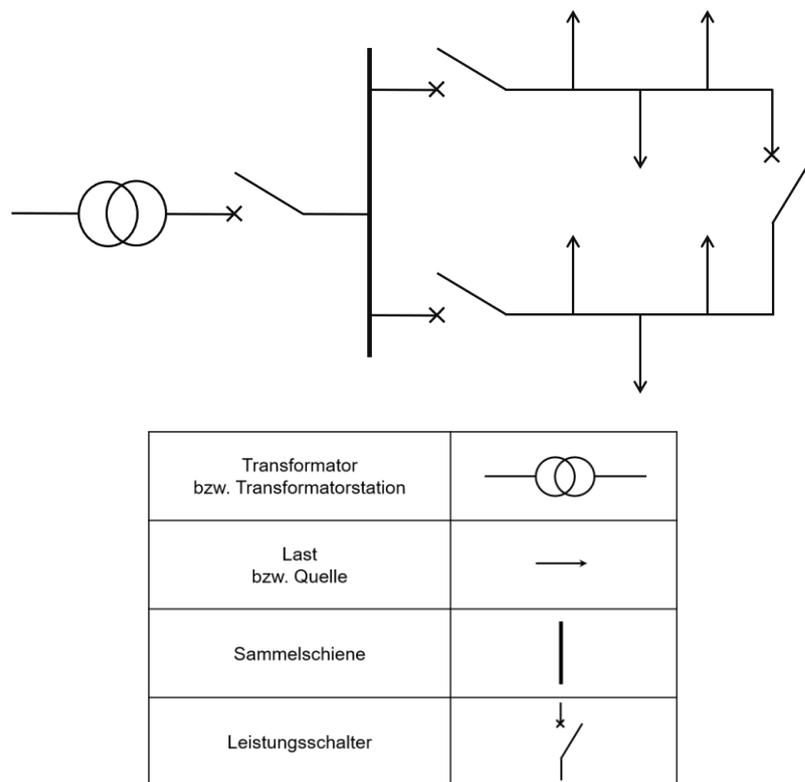


Abbildung 16: Übersichtsschema einphasig

Der in Abbildung 16 links dargestellte Transformator ist ein Niederspannungstransformator von 400 V auf 400 V, welcher zur galvanischen Trennung des Labordemonstrators vom Netz dient, bereits am Institut vorhanden ist und nicht Teil dieser Arbeit ist. Darauf folgen vier Kompaktleistungsschalter welche in einer Ringstruktur angeordnet sind. Zwischen den drei Leistungsschaltern, welche die Ringstruktur bilden, befinden sich Abgänge, an die Lasten bzw. Quellen angeschlossen werden können.

Basierend auf dieser Struktur wird der in Abbildung 17 dargestellte Detailplan mit den tatsächlich installierten Einbauten (Schutzgeräte, Steckverbinder, etc.) erstellt.

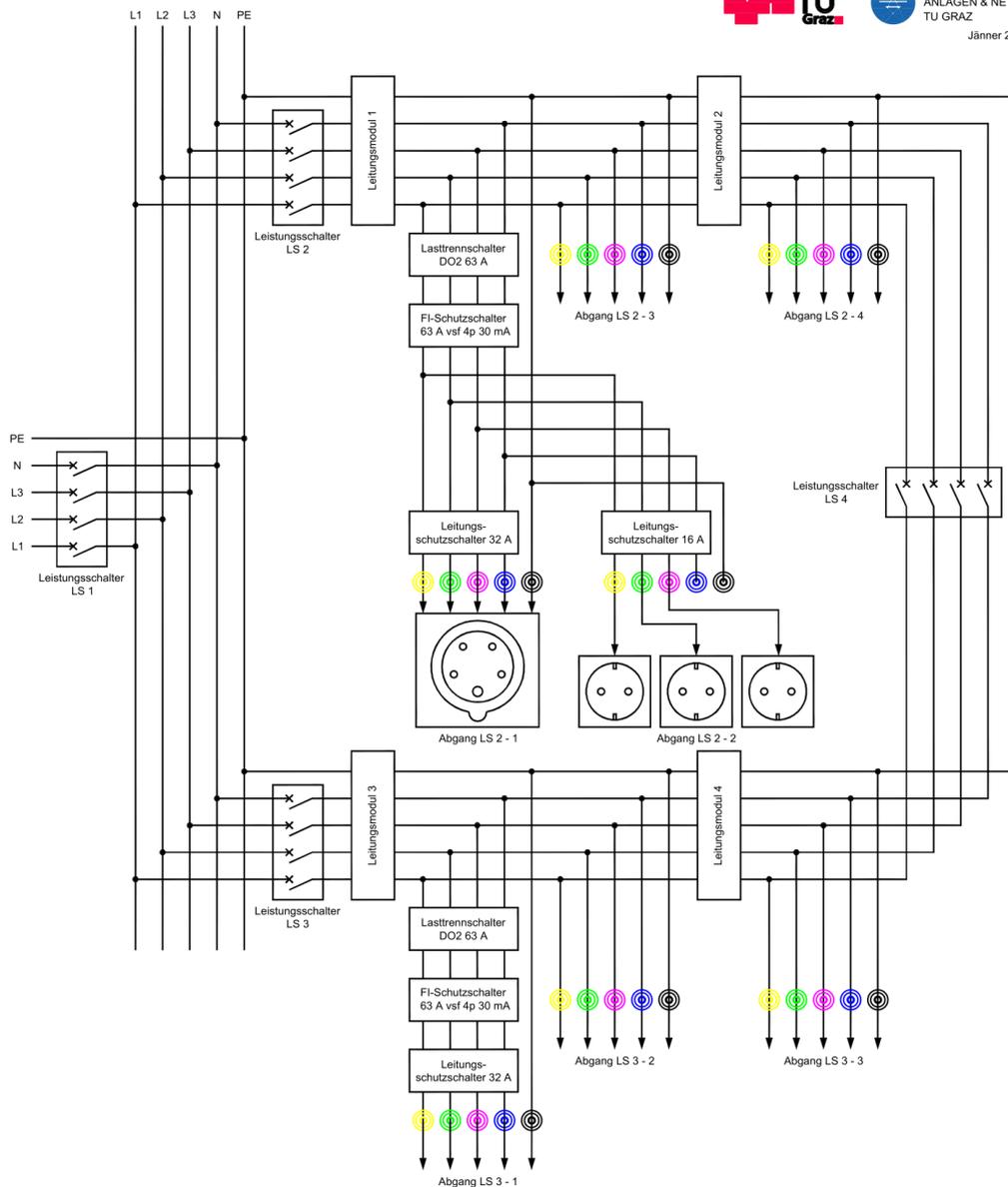


Abbildung 17: Mehrphasiger, schematischer Übersichtsplan

Im Vergleich zum einphasigen Übersichtsschema aus Abbildung 16 erkennt man im schematischen Übersichtsplan in Abbildung 17 die Ergänzung von vier Leitungsmodulen. Diese ermöglichen eine Steigerung der Flexibilität bei der Emulation von Leitungslängen und könnten optional am Labordemonstrator über 2x5-polige Leistungssteckverbinder (siehe Kapitel 3.2.7) angeschlossen werden. Im Zuge der vorliegenden Arbeit werden diese mittels geeigneter Kurzschlusssteckverbinder überbrückt. Der Entwurf bzw. die Erstellung einer entsprechenden Machbarkeitsstudie zu diesen optionalen Leitungsmodulen wird in einer weiteren Masterarbeit am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der Technischen Universität Graz behandelt. [30]

Weiters ist ersichtlich, dass nicht alle Abgänge nach dem gleichen Schutzprinzip abgesichert sind. Dadurch wird einerseits eine flexiblere Nutzung der Abgänge für spätere Laborübungen und weitere Verwendungszwecke ermöglicht und andererseits wird die Anzahl an benötigten Schutzgeräten und der Platzbedarf des Labordemonstrators reduziert.

Der letzte geometrische Entwurf der Komponenten des Labordemonstrators befindet sich im Anhang (Kapitel 7.2).

3.2 Wahl der Komponenten

Die Auswahl der zu installierenden Komponenten für den Labordemonstrator erfolgt unter Zuhilfenahme des detaillierten mehrphasigen Übersichtsplan (Abbildung 17). Die nachfolgenden Unterkapitel beschreiben alle installierten Komponenten sowie deren elektrischen und mechanischen Eigenschaften.

3.2.1 Leistungsschalter

Wie in Abbildung 17 erkennbar, werden vier Leistungsschalter installiert. Um die geforderte Kommunikationsfähigkeit gemäß Kapitel 2.7 zu erfüllen, werden Leistungsschalter des Fabrikats Siemens mit der Type 3VA2 025-5KQ42 verwendet. Abbildung 18 zeigt die Bedeutung der Zahlen und Buchstaben der Type der verbauten LS und wird in diesem Kapitel näher erläutert.

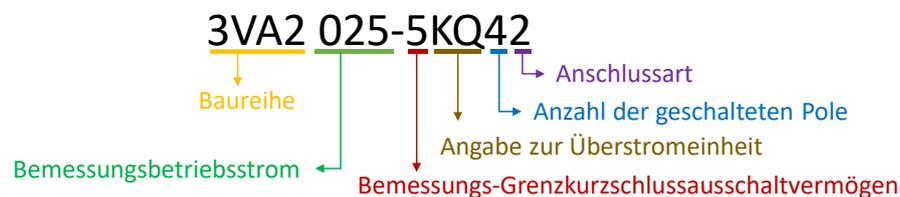


Abbildung 18: Bedeutung der Type der verbauten LS

Die ersten vier Stellen der Typenbezeichnung geben dabei Auskunft über die Baureihe des LS. Bei Geräten mit der Bezeichnung 3VA handelt es sich um einen Kompaktleistungsschalter aus dem Portfolio der SENTRON Schutz-, Schalt-, Mess- und Überwachungsgeräte. (Weitere Details siehe [7]).

Tabelle 7: Übersicht der Unterschiede der LS-Baureihe Siemens SENTRON 3VA [7]

	3VA1	3VA2
Anlagenschutz	■	■
Starterschutz	■	■
Motorschutz		■
Lasttrennschalter im Design eines Kompaktleistungsschalters nach IEC 60947-3	■	
Standardanwendungen bis 110 kA und thermisch-magnetische Überstromauslöser	■	
Anwendungen in Gleichstromnetzen (DC-Netzen)	■	
Generatorschutz		■
Hohe Schaltleistung		■
Selektivität		■
Kommunikation		■



Eine automatisierte Netzrekonfiguration erfordert eine entsprechende Kommunikation zwischen den einzelnen Leistungsschaltern weshalb sich für den Aufbau des beschriebenen Labordemonstrators nur ein LS der Serie 2 (3VA2) eignet.

Die nachfolgenden acht Ziffern und Buchstaben beschreiben die Nennwerte, die Kontaktausführung sowie die eingebauten Erweiterungskomponenten der Leistungsschalter. Beispielsweise indiziert 025 den Bemessungsbetriebsstrom von $I_n = 25 \text{ A}$ des integrierten elektronischen Überstromauslösers. Im Zuge dieser Arbeit wird jener LS der Baureihe mit dem kleinstmöglichen Bemessungsbetriebsstrom eingesetzt um bei den künftig geplanten Laborübungen mit möglichst geringen elektrischen Leistungen (entspricht kleinen Lasten) entsprechende Versuche implementieren zu können und dabei die Wärmeverluste der Verbraucher so gering wie möglich zu halten. Die Einstellbereiche der Auslösekennlinie, wie in Kapitel 2.6.4 beschrieben, sind abhängig vom Bemessungsbetriebsstrom. Bei diesem Modell kann der Überlastbereich von $I_r = 10 \text{ A}$ bis 25 A eingestellt werden.

Die darauffolgende Ziffer 5 gibt das maximale Bemessungsgrenzkurzschlussausschaltvermögen I_{cu} an. Fünf steht dabei für ein Bemessungsausschaltvermögen von $I_{cu} = 55 \text{ kA}$ bei Bemessungsspannung.

Die darauffolgenden beiden Buchstaben KQ geben Auskunft über die installierte elektronische Überstromeinheit (en electronic trip unit, ETU) und die zusätzlichen Schutzfunktionen wie zB den Erdschlussschutz. In diesem Fall bedeutet KQ, dass eine ETU 860 mit Erdschlussschutzfunktion integriert ist.

Die vorletzte Ziffer gibt die Anzahl der möglichen geschalteten Pole - in diesem Fall vier - an. Die Anzahl der geschalteten Pole kann jedoch elektronisch auf drei reduziert werden. Voraussetzung dafür ist zB, dass durch die Art des Erdanschlusses, wie in Kapitel 2.3 erläutert, kein Neutralleiter aufgrund eines TN-C-Systems angeschlossen ist.

Anhand der letzten Ziffern der Bezeichnung wird zwischen den Anschlusstechniken der Leitungen an den LS unterschieden. Insgesamt kann zwischen 12 verschiedenen Anschlussarten gewählt werden. Die beiden häufigsten Arten werden mit zwei oder sechs beschrieben. Eine Zwei fordert einen Anschluss über eine Schraubverbindung mit Kabelschuhen und eine Sechs einen Anschluss mittels Klemmen, welche eine Verdrahtung mit Kupfer- oder Aluschiene ermöglicht.

Um die Fernsteuerung der Leistungsschalter zu ermöglichen, wurde jeder mit einer passenden Motorantriebseinheit der Type SEO520 ausgestattet. Ebenso werden die einzelnen LS mit zwei zusätzlichen Hilfsschaltern, jeweils mit Wechselkontakten, versehen (Hilfskontakten). Diese unterscheiden sich jedoch in ihrer Auslösung: Der Hilfsschalter vom Typ HQ dient zur Ermittlung der Schalterstellung und der zweite Hilfsschalter vom Typ AUX-HQ dient zur Ermittlung einer etwaigen Auslösung des Leistungsschalters. Die Hilfsschalter werden in Verbindung mit den Steuerleitungen der Motorantriebe zu drei LED-beleuchteten Tastern an der oberen Tür des Verteilers geführt. Dadurch ist der Betriebsstatus an der Außenseite des Verteilers sichtbar und eine von der Software unabhängige Steuerung der Leistungsschalter möglich.

In Tabelle 8 sind die Toleranzen der in den LS verbauten Messeinheiten (jeweils eine Rogowskispule je Leiter/Pol) zusammengefasst, welche bei allen gemessenen Werten berücksichtigt werden müssen. [7]

Tabelle 8: Genauigkeitsangaben der LS [7]

Messwert	Zusatzbedingung	Genauigkeit in % vom abgelesenen Messwert
Strom	$0,08 I_b \dots 2 I_b$	$\pm 1 \%$
Spannung (L - N)	$80 \text{ V} < U < 480 \text{ V}$	$\pm 1 \%$
THD Strom	bis zur 19. Harmonischen $0,08 I_b \dots 2 I_b$	$\pm 5 \%$
THD Spannung	bis zur 19. Harmonischen $80 \text{ V} < U < 480 \text{ V}$	$\pm 5 \%$
Leistungsfaktor PF	$0,08 I_b \dots 2 I_b$	$\pm 0,05$ absolut
Wirkleistung	I_b und U_n wie unterhalb der Tabelle beschrieben	Klasse 2 nach IEC 61557-12
Wirkenergie	I_b und U_n wie unterhalb der Tabelle beschrieben	Klasse 2 nach IEC 61557-12
Blindleistung Scheinleistung	$0,08 I_b \dots 2 I_b$ PF $\geq 0,6$ induktiv PF $\geq 0,8$ kapazitiv	$\pm 2 \%$
Blindenergie Blindleistung	$0,08 I_b \dots 2 I_b$ PF $\geq 0,6$ induktiv PF $\geq 0,8$ kapazitiv	$\pm 2 \%$
Frequenz	$80 \text{ V} < U < 480 \text{ V}$	$\pm 0,1 \%$

I_b ist der maximale Strom in der relevanten Baugröße. Beispiel: 3VA21 $\rightarrow I_b = 160\text{A}$

U_n ist bezogen auf die Nennspannung der Messfunktion, zwischen Phase und Neutral

Alle angegebenen Genauigkeitsangaben beziehen sich auf eine Umgebungstemperatur von $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

Abbildung 19 zeigt die kleinstmöglichen einstellbaren Werte, für die Auslösezeiten und Stromstärken. Der Einstellbereich liegt beim L-Schutz (siehe u.a. Kapitel 2.6.4) für I_r im Bereich von 10 A bis 25 A und kann in 0,5-A-Schritten verändert werden, die Auslösezeit t_r kann von 0,5 s bis 25 s in 0,1 s-Schritten variiert werden. Diese Einstellschritte sind für alle Schutzbereiche ident. Die Parameter beim S-Schutz können von $I_{sd} = 15 \text{ A}$ bis 250 A und die Auslösezeiten von $t_{sd} = 0,05 \text{ s} - 0,5 \text{ s}$ eingestellt werden. Mit der I^2t -Funktion kann das thermische Gedächtnis aktiviert werden. Dadurch ändert sich die Gerade im S-Bereich in eine entsprechende Abstufung (siehe u.a. Kapitel 2.6.4). Für den unverzögerten I-Schutz kann aufgrund der schnellstmöglichen Auslösung des LS nur ein Stromwert von $I_i = 38 \text{ A}$ bis 300 A eingestellt werden. [7]

Auslösekennlinie

Parameter

Bestellnummer

ETU
ETU860

Bemessungsstrom I_n (A)
25

L-Schutz

I_r 10 10,00 A

t_r 0,5 500 ms

t_{min} 500 ms

S-Schutz

I_{sd} 15 15,0 A

t_{sd} 0,05 50,0 ms

I^2t

t_{min} 20,0 ms

I-Schutz

I_i 38 38,0 A

II
Gültigkeitsbereich: 38...300 A

Abbildung 19: Kleinstmögliche Einstellwerte des LS

Anhand der in Abbildung 19 getroffenen Einstellungen des Leistungsschalters ergibt sich die in Abbildung 20 dargestellte Auslösezeitkennlinie.

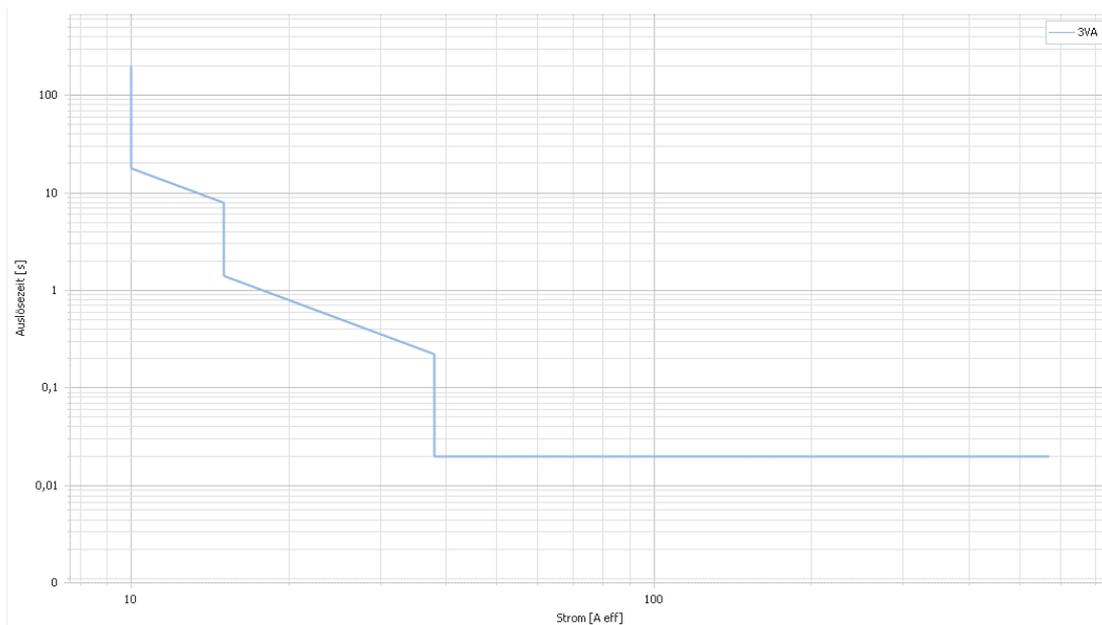


Abbildung 20: Auslösekennlinie für die kleinstmöglichen Einstellwerte gemäß Abbildung 19

3.2.2 Systemumschalter

Zum Anschluss an die elektrische Versorgung des Labordemonstrators werden zwei unterschiedliche Arten von Steckverbindern gewählt: Einerseits kann diese über einer 32-A-CEE-Kupplung und andererseits mittels Leistungslaborsteckverbindern (Fabrikat Stäubli, Type Powerline Datenblatt siehe Anhang Kapitel 7.1.6) erfolgen. Aufgrund dieser zwei unterschiedlichen Anschlussmöglichkeiten ist ein Umschalter erforderlich. Um eine garantierte Abschaltung zu gewährleisten, wird ein Umschalter mit Nullstellung gewählt (Fabrikat Kraus & Naimer, Type KG105.K950.E Datenblatt siehe Anhang Kapitel 7.1.4). Der Umschalter ist vierpolig, um entsprechende Freiheitsgrade in der Systememulationen (TT vs. IT vs. TN) zu erhalten. In der Entwurfsphase wurde ein maximaler Bemessungsstrom von 125 A angedacht, welcher im weiteren Verlauf allerdings aufgrund der gewählten Leistungslaborsteckverbinder auf 70 A reduziert wurde. Aufgrund der Beschaffung des Umschalters bereits vor endgültiger Dimensionierung ist dieser noch für einen Bemessungsstrom von 125 A ausgelegt. Alle weiteren technischen Eigenschaften des Systemumschalters können dem Datenblatt im Anhang Kapitel 7.1.4 der Arbeit entnommen werden.

3.2.3 Kommunikation

Zur Kommunikation der LS mit der Software Siemens SENTRON powerconfig ist ein Datenkonzentrator des Typs COM 100 oder COM 800 erforderlich. Der Unterschied zwischen diesen beiden Geräten liegt in der Anzahl der möglichen LS. Das Modul COM 100 erlaubt die Kommunikation mit einem und das COM 800 mit acht LS. Aufgrund der vier installierten LS wird ein COM 800 verwendet. Weiters wird je LS ein Kommunikationsmodul COM 60 integriert um die Verbindung zwischen COM 800 und dem LS mit einem 3 VA-Kabel⁶ zu ermöglichen. Abbildung 21 zeigt das Prinzipschema der Kommunikationsverbindung der vier Leistungsschalter samt der zugehörigen, zuvor beschriebenen Kommunikations-Peripherie. [7, 31]

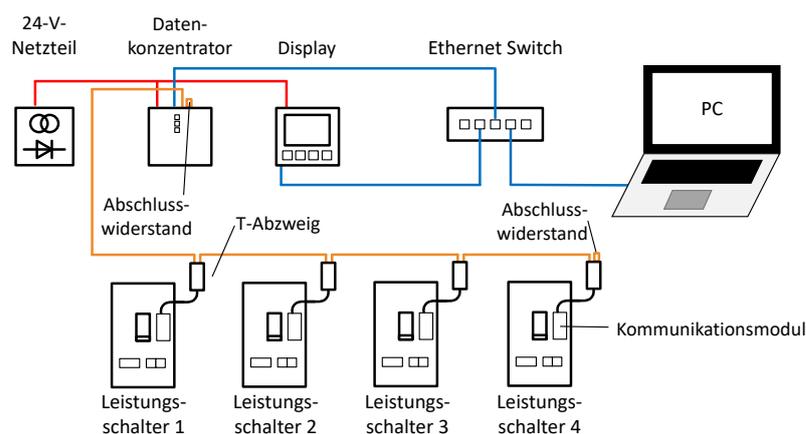


Abbildung 21: Prinzipschema der Kommunikation des LS

⁶ Spezielles, konfektioniertes Datenkabel zwischen den Kommunikationsmodulen der Leistungsschalter-Baureihe 3VA und dem Datenkonzentrator.

In der nachfolgenden Abbildung 22 ist der Aufbau der Kommunikation mit den für den Labordemonstrator verwendeten Komponenten zu sehen. Auf den COM 60 folgt ein T-Abzweig, der die Verbindung der Leistungsschalter untereinander sowie mit dem COM 800 ermöglicht. Dieser Aufbau kann bis zu einer Datenkabellänge von 20 m realisiert werden. Essenziell ist allerdings, dass am Anfang und am Ende ein Abschlusswiderstand eingefügt wird, damit das System abgeschlossen bzw. das Datenkabel an den zugehörigen Wellenwiderstand angepasst ist, damit keine Reflexionen im System auftreten.

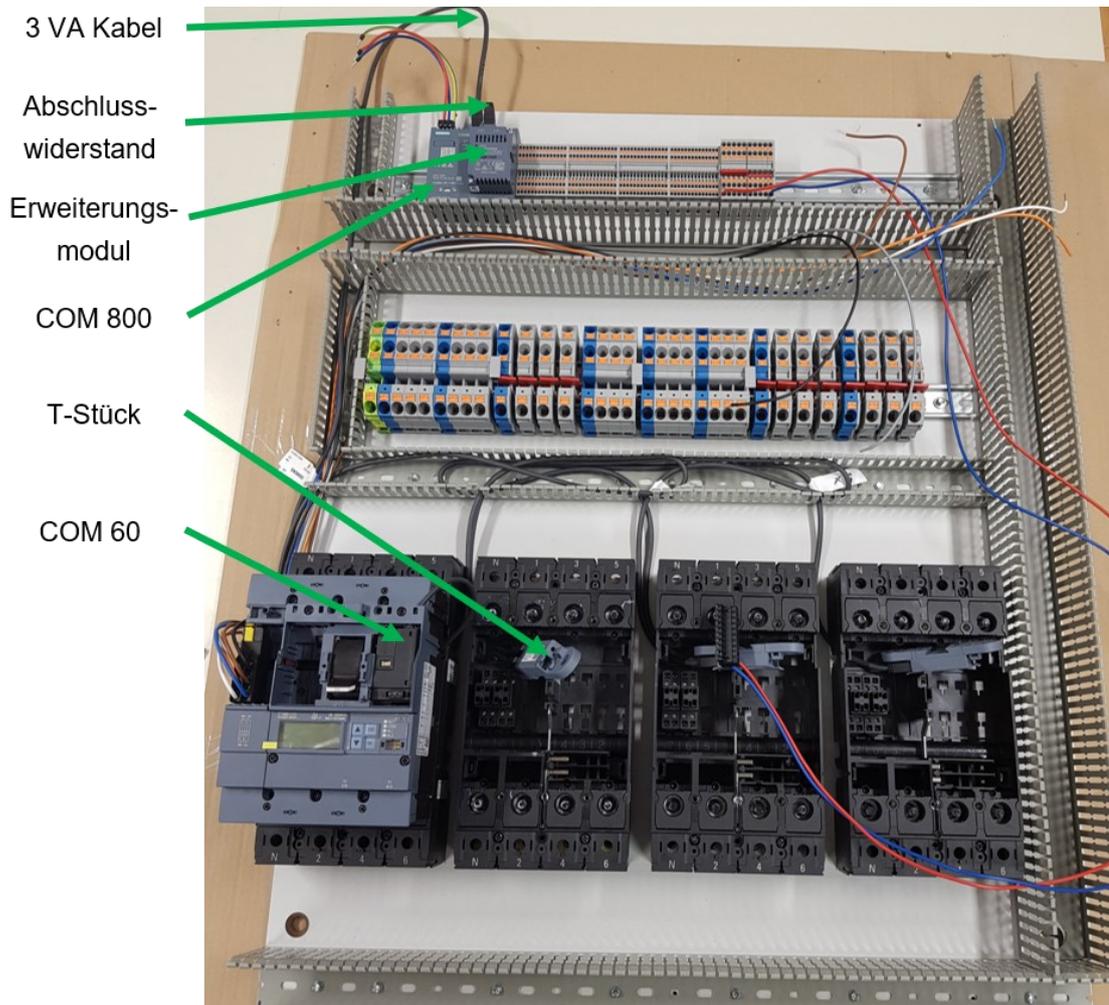


Abbildung 22: Fotografische Darstellung der verbauten Komponenten für die Kommunikation der LS

Das Modul COM 800 verfügt über eine RJ-45-Schnittstelle, welche die Kommunikation über ein Ethernet-Kabel ermöglicht. Durch den gleichzeitigen Einsatz eines Displays DSP 800 und einer Steuerung über die bereits erwähnte Software powerconfig wird diese RJ-45-Schnittstelle über den Ethernet Switch mit dem PC und dem Display verbunden.

3.2.4 Abgänge

Gemäß dem schematischen Detailplan in Abbildung 17 sind sieben Abgänge vorgesehen wobei zwischen abgesicherten und nicht abgesicherten Abgängen unterschieden wird.



3.2.4.1 Abgesicherte Abgänge

Die abgesicherten Abgänge spiegeln Abgangsstromkreise, wie sie in einem typischen Haushalt zu finden sind, wider. Es werden zwei Abgänge mit je einem vierpoligen D02-Sicherungslasttrennschalter mit 63-A-Sicherungen je Phase verwendet. Nachgelagert folgt ein vorsicherungsfester, unverzögerter vierpoliger Fehlerstromschutzschalter (FI) mit einem Bemessungsstrom von 63 A und einem Bemessungsfehlerstrom von 30 mA vom Typ A (Puls). Der auf den FI folgende obere Abgang teilt sich weiter in zwei Subabgänge auf. Von diesen ist jeweils einer durch einen vierpoligen 32-A-Leitungsschutzschalter und einer durch drei einpolige 16-A-Leitungsschutzschalter mit Neutralleiterdurchführung abgesichert. Alle Sicherungsautomaten sind vom Typ C. Im unteren Abgang befinden sich ebenfalls wieder nachgelagert nach demselben Sicherungslasttrennschalter und demselben FI drei einpolige 32-A-Leitungsschutzschalter mit einer Neutralleiterdurchführung.

3.2.4.2 Ungesicherte Abgänge

Über die abgesicherten Abgänge hinaus befinden sich im Labordemonstrator auch entsprechend ungesicherte Abgänge, um mehr Flexibilität zu ermöglichen. Diese Abgänge werden mit dem gleichen Leitungsquerschnitt wie im Hauptstromkreis angeschlossen und sind somit für den maximalen Strom von 70 A ausgelegt.

ACHTUNG: Auf eine entsprechend achtsame Verwendung der ungesicherten Abgänge ist mit Nachdruck hinzuweisen!

Sofern der Labordemonstrator nicht via des eingangsseitigen CEE-32-A-Steckverbinders mit ggfs. vorgelagerten Schutzmaßnahmen (zB Fehlerstrom-Schutzschaltung als Zusatzschutz) betrieben wird sind an diesen ungesicherten Abgängen keinerlei ergänzende Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag implementiert.

3.2.5 Anschlussvarianten durch unterschiedliche Steckverbinder

Durch die im Labordemonstrator installierten unterschiedlichen, in Österreich gebräuchlichen Steckverbinderarten wie zB CEE-32-Steckdose oder Sicherheits-Einbaustecker erweitern dessen Anwendungsmöglichkeiten.

Die ersten beiden abgesicherten Abgänge LS 2-1 und LS 2-2 sind mit Schutzkontaktsteckdosen (Schukosteckdosen, Bemessungsstrom 16 A) und einer CEE-32-Steckdose (Bemessungsstrom 32 A) ausgeführt.

Die übrigen Abgänge erfolgen über 4/6-mm-Laborleistungsbuchsen bzw. Sicherheits-Einbaustecker des Fabrikats Stäubli Type ID/S6AR-N-B4S ausgeführt. Diese sind demnach in der Lage, über standardisierte 4-mm-Messleitungen oder mit entsprechend leistungsfähigeren powerline-Messleitungen, Verbraucher zu versorgen aber ermöglichen auch eine Einspeisung einer Quelle. Dabei ist der maximale Strom zu beachten welcher vom Leitungsquerschnitt und den entsprechenden Steckverbindern abhängt. Die im Labor gebräuchlichen 4-mm-Sicherheitslaborstecker sind für einen maximalen Strom von 32 A und die Sicherheits-Einbaustecker für einen maximalen Strom von 80 A ausgelegt. [32]



3.2.6 Verteiler

Der Verteiler besteht aus zwei übereinander angeordneten Teilverteilern aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) mit jeweils einer Montageplatte aus Hartpapier und zwei separaten einflügeligen Türen. Mit Hilfe der mechanischen Werkstatt des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement wurde ein entsprechender Unterbau als Tragwerk zur Montage von Bock- bzw. Lenkrollen konstruiert und gefertigt, um größtmögliche Mobilität zu gewährleisten.

Der Verteiler weist Schutzart IP 44 auf und entspricht somit ÖVE/ÖNORM EN 61439-1 [23]. Laut Datenblatt des Verteilers, (siehe Anhang Kapitel 7.1.5) ist eine maximale Verlustleistung der installierten Betriebsmittel von 255 W bei $\Delta T = 20$ K zulässig. In der folgenden Tabelle 9 sind die Komponenten mit der höchsten Verlustleistung angeführt. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei um die maximale Verlustleistung handelt und diese Werte daher nur bei voller Auslastung (100 % Last) auftreten.

Tabelle 9: Maximale Verlustleistung der verbauten Komponenten

Komponenten	LS ⁷	COM ⁸	Netzgerät	Umschalter	Sicherungen	Sonstiges ⁹	Summe
Maximale Verlustleistung	4 W [33]	14,6 W [33]	82 W [33]	15,2 W (7.1.4)	94,3 W [34]	28,6 W	238,7 W

3.2.7 Leitungsmodul

Zur Nachbildung von Niederspannungsnetzen unterschiedlicher Ausdehnung besteht im Verteiler die Möglichkeit über vier serielle Trennstellen die Leitungslängen emulativ mit einzelnen Leitungsmodulen zu variieren. Die dafür eingesetzten Leistungssteckverbinder sind für einen maximalen Strom von 70 A ausgelegt und können mittels Kurzschlusssteckern überbrückt oder mit einem Leitungsmodul verbunden werden. Die Buchsen setzen sich dabei jeweils aus fünf Kontakteinsatzmodulen (Type HC-M-02-AT-F-16), einem Modulträgerrahmen (Type HC-M-B24-MFH-B) und einem Anbaugehäuse (Type HC-EVO-B24-BWD-PLRBK) zusammen. Die Kurzschlussstecker werden mit folgenden Komponenten konfiguriert: fünf Kontakteinsatzmodule (Type HC-M-02-AT-M-16), ein Modulträgerrahmen (HC-M-B24-MFH-H) und ein Gehäuse (HC-STA-B24-HHFD-BLANK-EL-AL). [35]

⁷ LS inklusive Motorantrieb und Hilfskontakte

⁸ Unter dem Begriff COM werden folgende Komponenten zusammengefasst: ein COM 100 und vier COM 60

⁹ Sonstige Komponenten beinhaltet: Leitungen, LEDs, Taster, Klemmen und 10 % Reserve



3.3 Elektrische Auslegung

Bei der elektrischen Auslegung der Komponenten müssen die Werte aus Kapitel 2.8.1 eingehalten werden. Die installierten elektrischen Betriebsmittel weisen unterschiedliche maximalen Bemessungsströme auf, welche in der folgenden Tabelle 10 zu finden sind.

Tabelle 10: Maximal zulässiger Bemessungsstrom der Komponenten

	16 mm ² Kabel	Leitungsmodul	LS-Sockel	Systemumschalter
Maximaler Dauerstrom	76 A [36]	70 A [35]	250 A [7]	125 A (7.1.4)

Der maximal zulässige Dauerstrom des elektrischen Aufbaus des Labordemonstrators definiert sich nach dem kleinsten Wert in der Tabelle und ergibt sich zu 70 A. Aufgrund des für den Laborbetrieb gewählten LS bzw. dessen Bemessungsstroms reduziert sich der maximale Betriebsstrom jedoch auf 25 A je Phase.

3.3.1 Bemessungsströme der Sicherungen

Die Bemessungsströme für die verwendeten Schmelzsicherungseinsätze werden in selektiver Abstimmung mit den Leitungsschutzschaltern und der Fehlerstrom-Schutzeinrichtung ausgewählt. Diese Größen können aus den genormten Werten, wie in Kapitel 2.6.1 erwähnt, ausgewählt werden. Als Faustregel für die selektive Abstimmung der Sicherungen kann entweder ein Faktor von 1,6 für die übergeordnete Sicherung oder die übernächste Bemessungsstromgröße als Vorsicherung gewählt werden. Für einen 32 A LSS ergibt sich somit eine Vorsicherung von mindestens $32 \text{ A} \cdot 1,6 = 51,2 \text{ A}$. Der nächste genormte Bemessungsstrom zu diesem Stromwert beträgt 63 A. Daher wurde für die übergeordnete Sicherung eine 63 A Sicherung verwendet. [1, 8]

3.3.2 Leiterquerschnitte

Die minimalen Leiterquerschnitte sind nach dem Bemessungsstrom der installierten Geräte zu dimensionieren. Aufgrund des maximalen Dauerstroms von 70 A wird für die allgemeine Ringverdrahtung ein Querschnitt von 16 mm² (Verdrahtungsleitung, Kupfer, feindrähtig, H07V-K (Yf) 16mm²) gewählt, der für eine Stromstärke von bis zu 76 A geeignet ist. Zu den CEE-32-Steckverbindern ist eine 4-mm²-Verdrahtungsleitung, welche einen maximalen Strom von 32 A zulässt, verlegt. Mit einer 1,5-mm²-Verdrahtungsleitung (Maximaler Bemessungsstrom $I_n = 17 \text{ A}$) ist die elektrische Verbindung zu den Spannungsabgriffen an der Tür des Labordemonstrators ausgeführt. Die Zuleitung zur 24-V-DC-Versorgung wird mittels einer dreipoligen 1,5-mm²-Baustellenleitung (K35) realisiert was einen maximal zulässigen Strom von 15 A zur Folge hat. Die abgesicherten Abgänge sind mit 10-mm²-Verdrahtungsleitungen versorgt, welche für einen Strom von 57 A geeignet sind. Die Verdrahtung der Hilfskontakte sowie der LED-Taster im oberen Teil der Verteilertür sind mittels 1,5-mm²-Verdrahtungsleitungen ausgeführt. Die 24-V-Steuerspannungsversorgung erfolgt mittels zwei 2,5-mm²-Leitungen was in einer maximalen Strombelastbarkeit von 24 A resultiert. [34, 36]



3.4 Mechanische Auslegung

Wie bereits in Kapitel 2.8 erwähnt, muss bei der Auslegung der Komponenten deren Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen berücksichtigt werden. Dabei sind die beiden wichtigsten Punkte der Korrosionsschutz und die Schutzart des Gehäuses. Für das Gehäuse des Labordemonstrators muss, wie bereits in Kapitel 2.8.4 erwähnt, mindestens eine Schutzart IP2X verwendet werden.

Genauso wichtig ist die statische Stabilität des Labordemonstrators. Damit Verletzungsgefahr durch das Umkippen des Verteilers während eines Versuches oder beim Transport vermieden wird, ist es wichtig, einen möglichst niedrigen Schwerpunkt zu finden. Um dieses Ziel zu erreichen, befinden sich die schweren Komponenten im unteren Teil des Verteilers.

Die schwersten Komponenten sind die LS samt Sockel und Motorantrieb mit einer Masse von ca. 8 kg. Deshalb werden die vier LS mit einer Gesamtmasse von ca. 36 kg so tief wie möglich auf der unteren Montageplatte montiert. Das zweite schwere Objekt ist ein 24-V-DC-Netzteil im Verteiler, das mit einer Masse von ca. 3 kg ebenfalls im unteren Teil des Labordemonstrators montiert wurde. Die 16-mm²-Verdrahtungsleitungen (0,33 kg/m) sind hinsichtlich der Masse nicht vernachlässigbar und ergeben in Summe (bei einer verlegten Leitungslänge von 80 m im Verteiler!) eine zusätzliche Masse von 26,4 kg. [33, 34]

Zur Reduktion der Kippgefahr beim Ein- und Ausstecken der Messstrippen sind diese an der unteren Tür des Labordemonstrators angebracht. Die seitlichen Anschlüsse stellen - bezogen auf die Kippgefahr des Labordemonstrators aufgrund der kleineren Standbreite ein geringes Risiko dar.

4 Ergebnisse

4.1 Laboraufbau

Dieses Kapitel beinhaltet Abbildungen des fertiggestellten Labordemonstrators und Ergebnisse der Messungen, welche im Zuge der Erstinbetriebnahme durchgeführt worden sind. Bevor die Verkabelung des Verteilers erfolgen kann, wird ein einphasiger Stromlaufplan angefertigt, siehe dazu nachfolgende Abbildung 23.

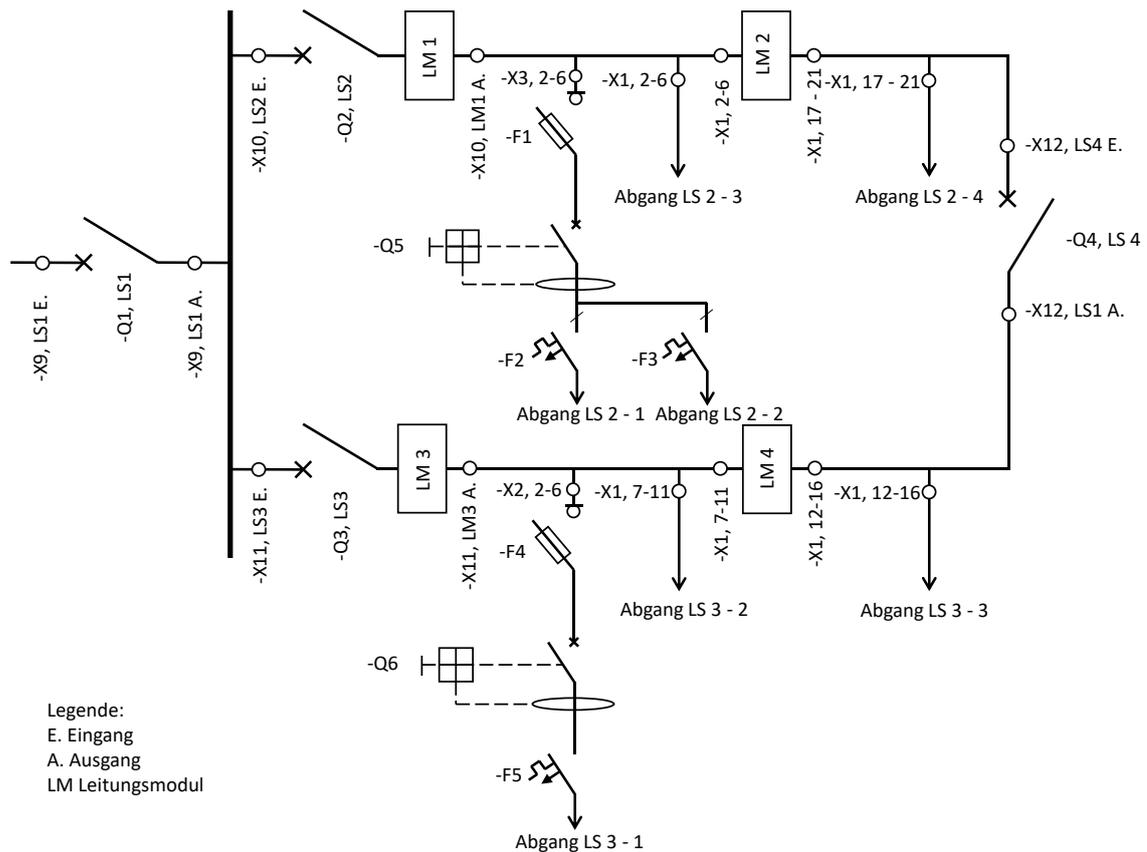


Abbildung 23: Einphasiger Stromlaufplan

Tabelle 11 und Tabelle 12 zeigen die Bedeutung der verwendeten Schutzgeräte und deren technische Kenndaten.

Tabelle 11: Bedeutung der Symbole des einphasigen Stromlaufplans

Schutzgerät	Symbol
Fehlerstrom-Schutzeinrichtung	
Sicherheitslasttrennschalter	
Leitungsschutzschalter	

Tabelle 12: Technische Kenndaten der verwendeten Schutzgeräte

Bezeichnung gemäß Abbildung 23	Schutzgerät	Strom	Anzahl der geschalteten Pole	Typ
-F1	Sicherungslasttrennschalter	$I_n = 32 \text{ A}$	3	gG
-F2		$I_n = 32 \text{ A}$	3	gG
-F3	Leitungsschutzschalter	$I_n = 32 \text{ A}$	4	C
-F4		$I_n = 16 \text{ A}$	3 x 1	C
-F5		$I_n = 32 \text{ A}$	3 x 1	C
-Q1	Leistungsschalter	$I_n = 10 - 25 \text{ A}$	4	-
-Q2		$I_n = 10 - 25 \text{ A}$	4	-
-Q3		$I_n = 10 - 25 \text{ A}$	4	-
-Q4		$I_n = 10 - 25 \text{ A}$	4	-
-Q5	Fehlerstromschutzschalter	$I_n = 40 \text{ A}$ $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$	4	A (Puls), vsf ¹⁰
-Q6		$I_n = 40 \text{ A}$ $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$	4	A (Puls), vsf ¹⁰

Abbildung 24 zeigt die drei möglichen optischen Signalisierungen sowie die entsprechend zugehörigen Schaltzustände (Schaltstatus) der Leistungsschalter. In diesem Zusammenhang steht grün für ein (LS Kontakte geschlossen), rot für aus (LS Kontakte geöffnet) und gelb-rot gleichzeitig für die Auslösung des LS (LS Kontakte geöffnet). Zur Quittierung nach Auslösung eines Leistungsschalters ist zuerst der gelbe Taster und im Anschluss der rote Taster zu betätigen, damit dieser LS wieder einschaltbereit ist.

¹⁰ Vorsicherungsfest

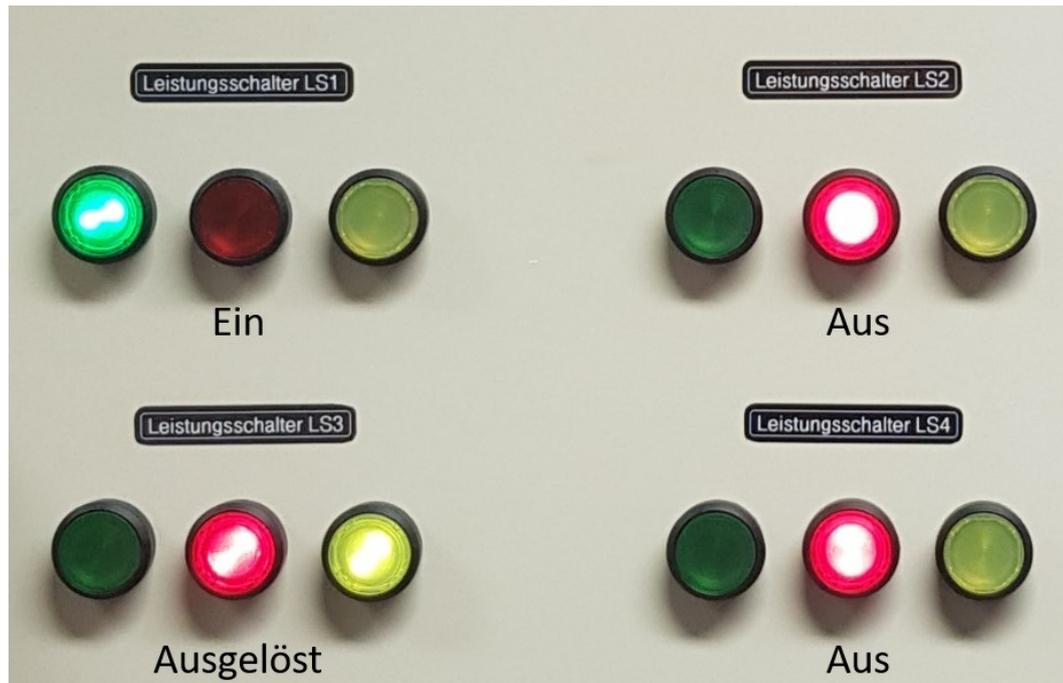


Abbildung 24: Zustände der Leistungsschalter

Abbildung 24 zeigt die geschlossene Frontansicht des Verteilers. Im oberen Bereich befinden sich die Taster für jeden LS. Neben den Tastern ist das Display (Fabrikat Siemens, Typ DSP 800) angeordnet, auf dem alle Messwerte der einzelnen LS angezeigt werden können. Die untere Tür des Labordemonstrators zeigt den Detailplan mit den Spannungsabgriffen pro Zweig. Diese Abgriffe werden mit den üblichen 4-mm-Sicherheitslaborbuchsen realisiert und sind für eine maximale Stromstärke von 17 A geeignet.

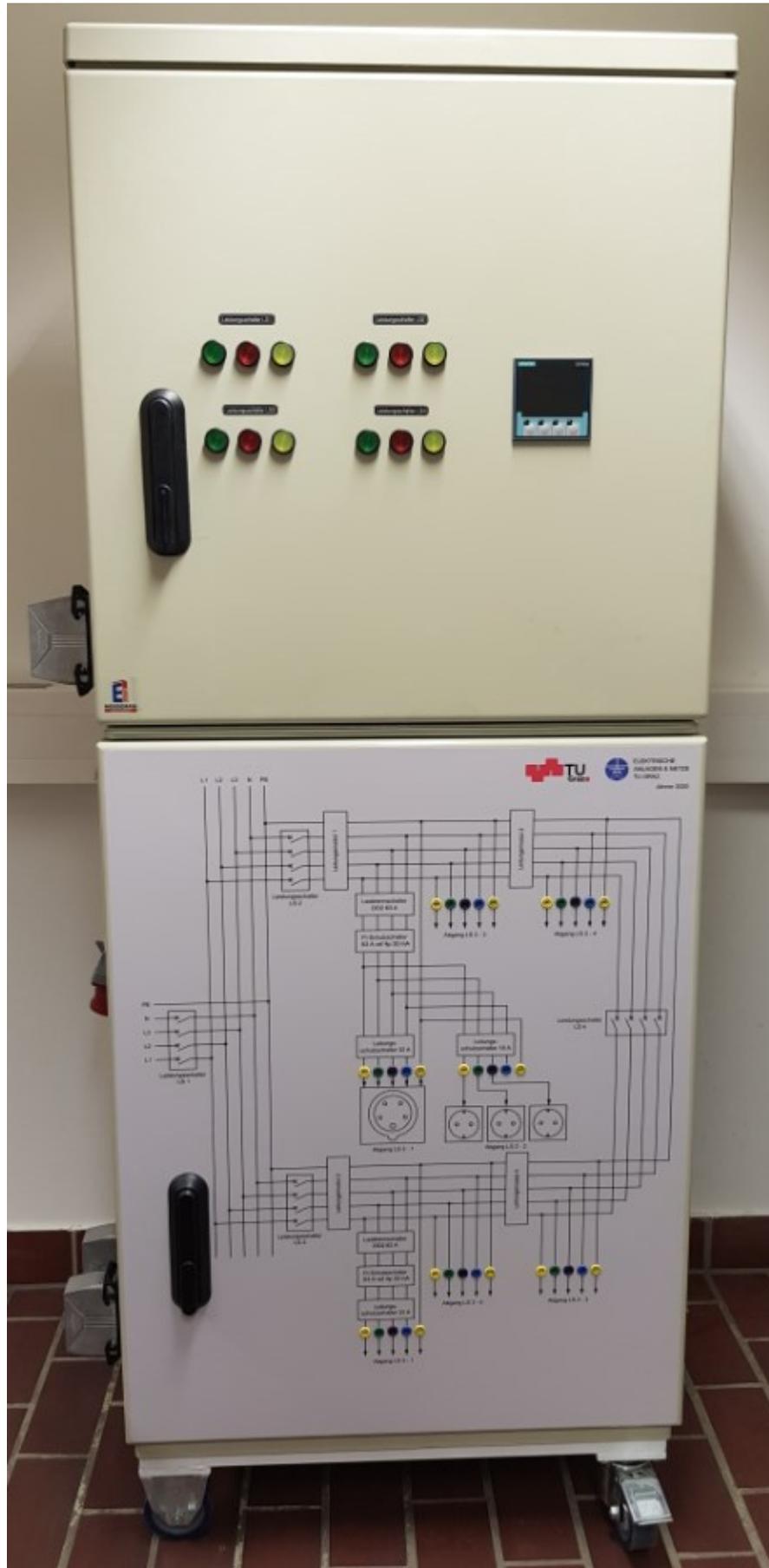


Abbildung 25: Geschlossene Frontansicht des Labordemonstrators



Abbildung 26 und Abbildung 27 zeigen die Seitenansichten des Labordemonstrators. Die linke Seite ist die Eingangsseite für die Stromversorgung (Leistung) sowie der Steuerspannungsversorgung (u.a. für die Kommunikation). Bei der Stromversorgung des Labordemonstrators kann zwischen zwei Anschlussmöglichkeiten gewählt werden. System eins ist die Versorgung über einen CEE-32-Steckverbinder und ist damit auf eine Stromstärke von 32 A begrenzt. System zwei bildet den Anschluss mit Powerline oder 4-mm-Laborsteckern und ist damit für einen maximalen Strom von 70 A ausgelegt. Weiters befindet sich dort eine RJ-45-Datensteckdose für die Kommunikation der LS mit dem Rechner und der Siemens powerconfig-Software. Ebenfalls auf der linken Seite befinden sich die seriellen Trennstellen für die optionalen Leitungsmodule, welche in Kapitel 3.2.7 erläutert werden. Auf der rechten Seite des Labordemonstrators befindet sich die Ausgangsseite, auf der die Abgänge, die in der Frontansicht zu sehen sind, ausgeführt sind.



Abbildung 26: Linke Ansicht des Labordemonstrators



Abbildung 27: Rechte Ansicht des Labordemonstrators

In Abbildung 28 ist die elektrische Installation der oberen Hälfte des Labordemonstrators dargestellt. Im oberen Bereich befindet sich die Klemmen für die Abgänge, auf den unteren beiden Hutschienen sind die Sicherungen, Fehlerstromschutzschalter sowie Leitungsschutzschalter für die abgesicherten Abgänge situiert. Weiters befindet sich auf der rechten Seite eine durchsichtige Kunststoff-Abdeckung als Berührungsschutz vor den blanken Anschlussklemmen der Abgänge und auf der linken Seite ein Ethernet-Switch für die Kommunikation.

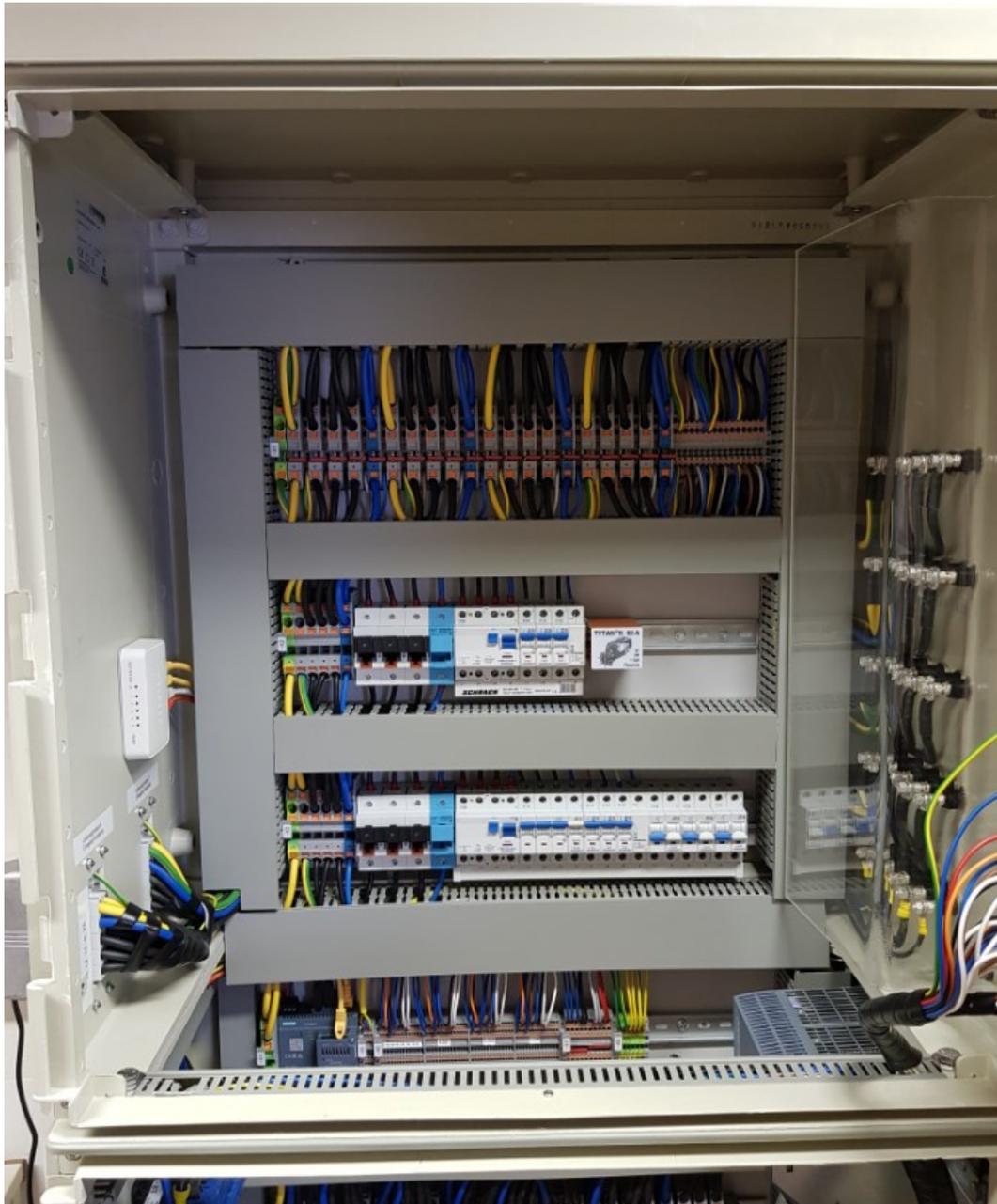


Abbildung 28: Offene obere Frontansicht des Labordemonstrators

In Abbildung 28 ist die elektrische Installation in der unteren Hälfte des Labordemonstrators dargestellt. In der untersten Reihe sind die vier Leistungsschalter angebracht, darüberliegenden befinden sich Reihenklammern um ausreichend Flexibilität für künftige Anwendungen zu gewährleisten. Auf der obersten Hutschiene befindet sich das

Kommunikationsmodul COM 800 und die Reihenklempen für die 24-V-DC-Versorgung, die Hilfskontakte der LS und die des Motorantriebs zur Fernauslösung mit den zuvor erläuterten Tastern. Rechts oben ist das Netzteil für die 24-V-DC-Versorgung der Kommunikationskomponenten verbaut. Auf der linken Seite befindet sich in blau der Systemumschalter zur Wahl der Stromversorgung (Powerline vs. CEE 32).

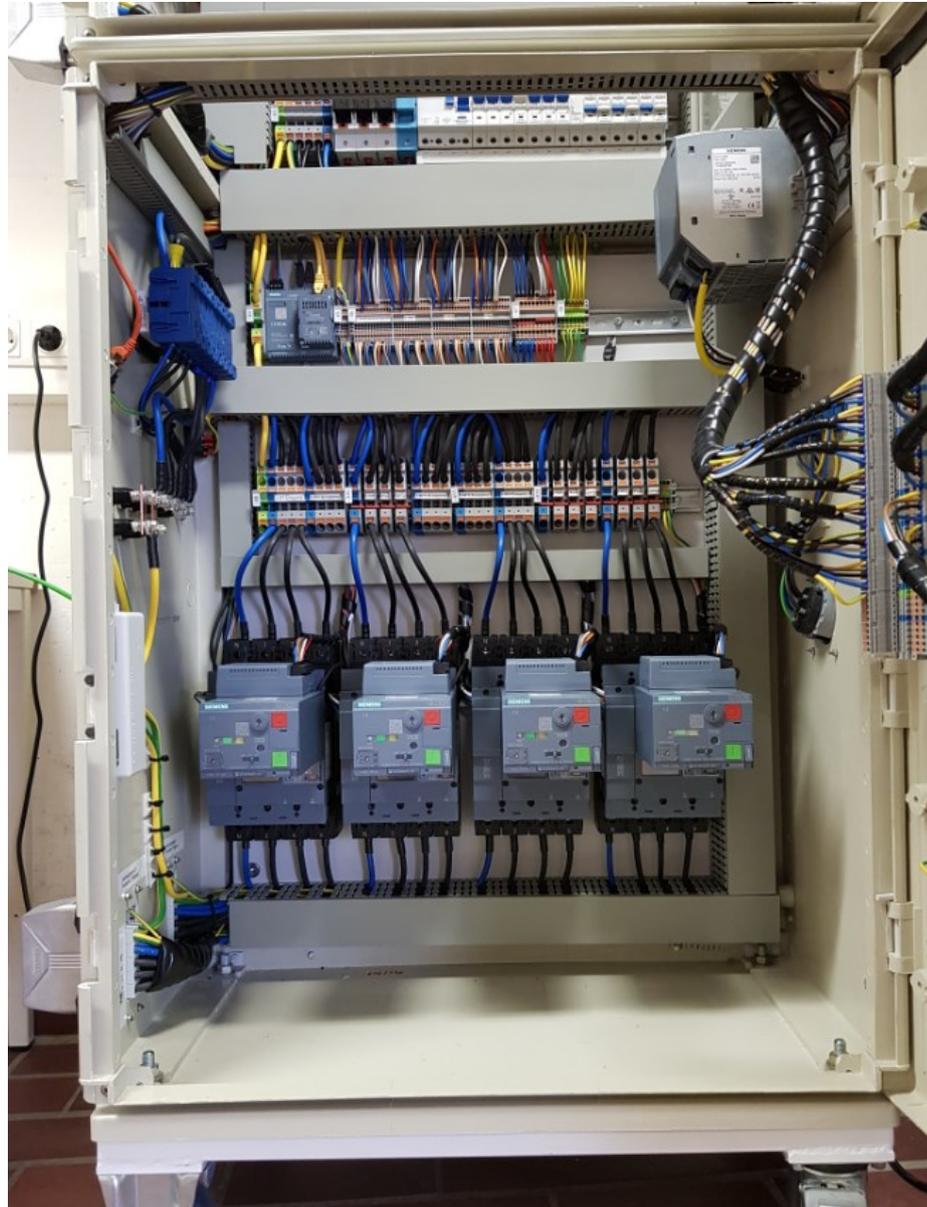


Abbildung 29: Offene untere Ansicht des Labordemonstrators

Abbildung 30 zeigt die Klemmleiste der oberen Tür. Die Klemmen sind mit Steckverbindern ausgeführt, um eine einfache Demontage und eine separate Verdrahtung der Tür zu ermöglichen.

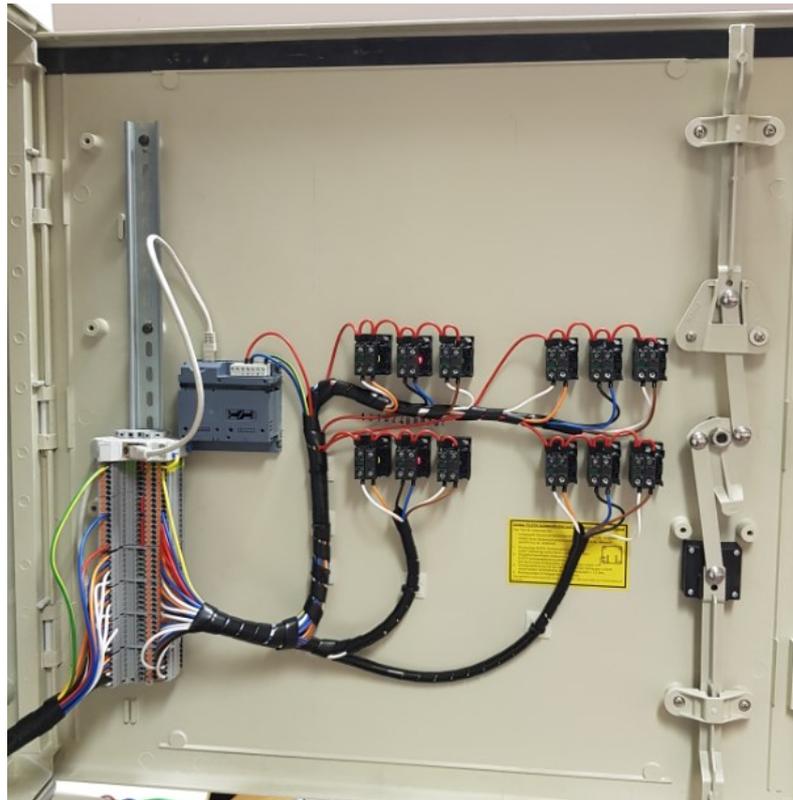


Abbildung 30: Innere Ansicht der oberen Türe des Labordemonstrators

Abbildung 31 zeigt die Klemmleiste für die untere Tür. Wie bei der oberen Tür werden die Klemmen mit Steckverbindern ausgeführt, um u.a. ein einfaches Demontieren der Tür für Adaptierungszwecke zu ermöglichen.

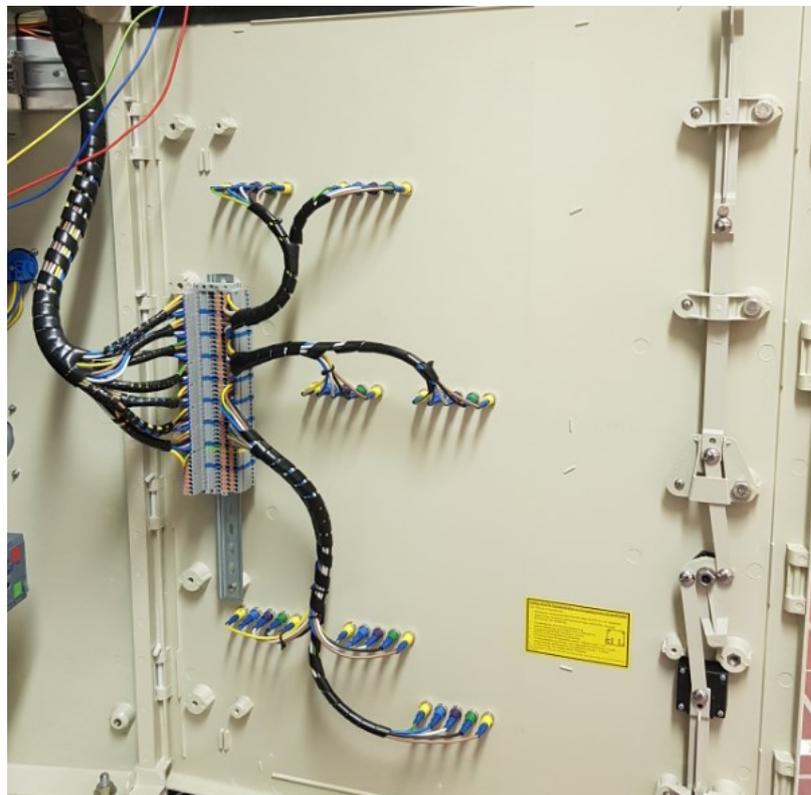


Abbildung 31: Innere Ansicht der unteren Türe des Labordemonstrators



Angesichts der Tatsache, dass der Labordemonstrator ausschließlich an entsprechenden Laborstromversorgungen (welche in der Regel über eine Not-Aus-Einrichtung verfügen) betrieben werden darf wird auf einen separaten Not-Aus-Schalter verzichtet. Ein solcher kann jedoch jederzeit in Verbindung mit einem entsprechenden Schütz nachgerüstet werden.

4.2 Konfiguration der Kommunikationsparameter

In diesem Kapitel werden die Kommunikationsparameter festgelegt. Jedes Gerät benötigt die gleiche Netzwerkadresse, welche durch die ersten drei Teilwerte für ein Subnetz von 255.255.255.0 angegeben wird. Als Netzwerkadresse wird 192.168.1 gewählt. Bei IP-Adressen ist darauf zu achten, dass kein Gerät die gleiche Host-Adresse hat. Die Host-Adresse ist als letzte Stelle der IP-Adresse definiert und kann Werte zwischen 0 und 255 annehmen. Tabelle 6 zeigt die IP-Adressen der Kommunikationskomponenten. [31]

Tabelle 13: IP-Adressen der verbauten Geräte

Geräte	COM 800	DSP 800	Computer
IP- Adresse	192.168.1.9	192.168.1.10	192.168.1.30
Subnetzmaske	255.255.255.0		

Bei der Konfiguration der LS werden ebenfalls Adressen vergeben. Allerdings sind dies Modbus-Adressen, wo Werte von 1 bis 126 vergeben werden können. Tabelle 14 zeigt die jeweiligen Schalteradressen.

Tabelle 14: Schalteradressen

Gerät	LS 1	LS 2	LS 3	LS 4
Modbus Adresse	1	2	3	4

Um die korrekte Konfiguration zu überprüfen, gibt es in der Siemens powerconfig-Software einen Ping-Befehl. Alternativ können die Geräte im Netzwerk über die Windows-Eingabeaufforderung mit dem Befehl `ping "IP-Adresse"` auf eine aufrechte Netzwerkverbindung geprüft werden. Zur weiteren Überprüfung kann in der Eingabeaufforderung der Befehl `arp -a` eingegeben werden um alle, im Netzwerk vergebenen bzw. aktiven IP-Adressen darzustellen. Abbildung 32 zeigt zwei erfolgreiche Ping-Befehle mittels der powerconfig-Software. Aufgrund der Modbus-Adresse können LS nicht über Windows angepingt werden, deshalb ist die Verwendung der powerconfig-Software vorteilhaft, da diese den Ping-Befehl für LS beinhaltet.

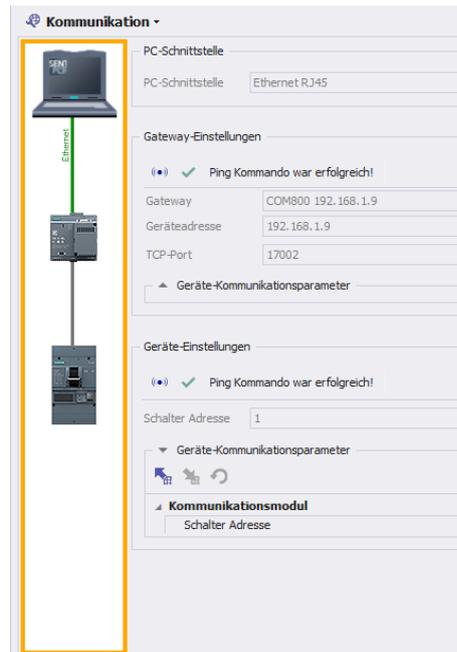


Abbildung 32: Erfolgreiche Ping Kommandos zwischen PC, Kommunikationsmodul und LS 1

4.3 Prüfungen bzw. Messungen

Mit Hilfe der powerconfig-Software können die in Abbildung 33 dargestellten Messdaten sowie Einstellbereiche aus den Leistungsschaltern gelesen werden.



Abbildung 33: Mess- und Einstellmöglichkeiten der LS

Für die Messungen werden, die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Messgeräte verwendet:

Tabelle 15: Verwendete Messgeräte für die nachfolgenden Messungen

Position	Beschreibung	Messbereich	Type	Fabrikat	Inv.-Nr.
1	Mehrkanalmesssystem		DEWE2-A4	Dewetron	0176022
2	Spannungsmodul	300 mV – 1000 V [37]	TRION- 2402-V	Dewetron	0176023
3	Stromzange	0,5 A - 240 A [38]	MN 38	Chauvin Arnoux	MN 38-9
4	Stromzange	0,5 A - 240 A [38]	MN 38	Chauvin Arnoux	MN 38-7
5	Stromzange	0,5 A - 240 A [38]	MN 38	Chauvin Arnoux	MN 38-8
6	Stromzange	0,5 A - 240 A [38]	MN 38	Chauvin Arnoux	MN 38- 20
7	Multimeter	60 mV – 600 V [39]	METRAHIT ENERGY	GOSSSEN METRAWATT	0176006
8	Stromzange	0 A – 1400 A [40]	345 PQ	Fluke	0081398
9	Installationstester	0,00 Ω – 2000 Ω 0,0 ms – 2000 ms	1654 B	Fluke	k.A.

4.3.1 Allgemeine Inbetriebnahme

Bevor der Labordemonstrator in Betrieb genommen wird, muss seine ordnungsgemäße Funktion gemäß Norm OVE E 8101:2019-01-01 [8] überprüft werden. Zuerst ist eine ausführliche Sichtprüfung auf offensichtliche Mängel wie beispielsweise Klemmstellen, Abdeckungen, Isolierungen, Verdrahtung, Polung, etc. durchzuführen. Im Anschluss daran erfolgen die Erprobung und Messung des Labordemonstrators. Dabei sind folgende Punkte, sofern relevant, vorgeschrieben:

- a) *Durchgängigkeit der Leiter [...];*
- b) *Isolationswiderstand der elektrischen Anlage [...];*
- c) *Messung des Isolationswiderstandes zum Nachweis der Wirksamkeit des Schutzes durch SELV, PELV oder durch Schutztrennung [...];*
- d) *Messung des Isolationswiderstandes zum Nachweis der Wirksamkeit von isolierenden Fußböden und isolierenden Wänden [...];*
- e) *Spannungspolarität [...];*
- f) *Prüfung der Wirksamkeit des Schutzes durch automatische Abschaltung der Stromversorgung [...];*
- g) *Zusätzlicher Schutz (Zusatzschutz) [...];*
- h) *Prüfung der Phasenfolge der Außenleiter [...];*
- i) *Funktionsprüfungen [...];*
- j) *Spannungsabfall [...].* [8]

Die Durchgangsprüfung der einzelnen Leitungsverbindungen wird mit dem Multimeter (siehe Tabelle 15, Pos. 7) ausgeführt wobei der in Abbildung 23 dargestellte Strompfad überprüft wird.

Nach erfolgreicher Durchgangsprüfung werden die Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag und somit die Punkte e bis h überprüft welche im nachfolgenden Kapitel 4.3.2 erläutert werden.

4.3.2 Überprüfung der Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag

4.3.2.1 Fehlerstromschutzschalter

Zur Überprüfung der korrekten Auslösung der eingebauten Fehlerstromschutzeinrichtungen (FI) ist eine Messung der Auslösezeiten mit einem entsprechenden Installationstester – hier mit dem Fluke Installationstester (siehe Tabelle 15, Pos. 9) – durchzuführen. Dabei wird ein vom Schutzgerät (FI) vorgegebener Bemessungsfehlerstrom von $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ und die Stromart (zB Typ A FI sensitiv auf Wechselströme und pulsierende Gleichströme) eingestellt. Zu Beginn der Arbeiten am Labordemonstrators wurde ein kurzzeitverzögerter FI installiert (Bauart G) welcher zur Auslösung des übergeordneten FIs (in der vorhandenen Labor- bzw. Hausinstallation) führte. Aufgrund dessen wurde der Fehlerstromschutzschalter gegen einen unverzögerten pulsstromsensitiven FI (Typ A, Bauart unverzögert) ausgetauscht. Mit dem Tausch konnte eine entsprechende (Teil-)Selektivität erreicht werden, die Messwerte der Prüfung der beiden im Demonstrator verbauten Fehlerstromschutzschalter sind der nachfolgenden Tabelle 16 zu entnehmen.

Tabelle 16: Auslösezeiten der verbauten Fehlerstromschutzschalter

Fehlerstromschutzschalter	Prüfstrom	Auslösezeit Wechselstrom	Auslösezeit Pulsstrom	maximale Auslösezeit gemäß [41]
-	$I_{\Delta n}$	ms	ms	ms
-Q5 (63/4/003 -A, vsf)	$0,5 \cdot I_{\Delta n}$	> 310	>310	k.A.
	$1 \cdot I_{\Delta n}$	158,2	137,7	< 300
	$5 \cdot I_{\Delta n}$	29,2	30,3	< 40
-Q6 (63/4/003 -A, vsf)	$0,5 \cdot I_{\Delta n}$	> 310	> 310	k.A.
	$1 \cdot I_{\Delta n}$	159,7	141,8	< 300
	$5 \cdot I_{\Delta n}$	30,1	38,3	<40

Die gemessenen Abschaltzeiten aus Tabelle 16 sind gemäß OVE EN 61008-1:2018-04-01 [41] (maximal zulässige Abschaltzeit von 0,3 s bei $1 \cdot I_{\Delta n}$ und 40 ms bei $5 \cdot I_{\Delta n}$) im normativen Rahmen.

Ein weiterer vorgeschriebener Wert ist die Messung der Schleifenimpedanz. Gemäß OVE EN 8101:2019-01-01 [8] sind dabei die Grenzwerte gemäß Formel (1) zu berechnen:

$$Z_s(m) \leq \frac{2}{3} \cdot \frac{U_0}{I_a}; Z_s(m) \leq \frac{2}{3} \cdot \frac{253 \text{ V}}{5 \cdot 32 \text{ A}}; Z_s(m) \leq 1,05 \text{ } \Omega \quad (1)$$

$Z_s(m)$ Maximale Impedanz der Schleife aus Außenleiter und geerdetem Neutralleiter
 U_0 Maximale Spannung Außenleiter gegen Erde
 I_a Strom, welcher die automatische Ausschaltung der Schutzeinrichtung innerhalb von 0,4 s ermöglicht.



Tabelle 17 zeigt die gemessenen Schleifenimpedanzen der gesicherten Abgänge am Labordemonstrator.

Tabelle 17: Schleifenimpedanz der gesicherten Abgänge

Position	Abgang	Z_s	I_k	$Z_s(m)$		
-	-	Ω	A	Ω		
Seitlich	LS 2 – 1 L1	0,90	253	1,05		
	LS 2 – 1 L2	1,05	218			
	LS 2 – 1 L3	1,02	225			
	Seitlich	LS 2 – 2 L1	1,25	181	2,1	
		LS 2 – 2 L2	1,42	161		
		LS 2 – 3 L3	1,40	164		
	Seitlich	LS 2 – 3 L1	0,88	258	1,05	
		LS 2 – 3 L2	1,03	222		
		LS 2 – 3 L3	1,01	227		
Türe		LS 2 – 1 L1	0,90	251		1,05
		LS 2 – 1 L2	1,16	197		
	LS 2 – 1 L3	1,14	202			
	Türe	LS 2 – 2 L1	0,98	233	2,1	
		LS 2 – 2 L2	1,08	212		
		LS 2 – 3 L3	1,05	219		
	Türe	LS 2 – 3 L1	0,96	236	1,05	
		LS 2 – 3 L2	1,19	193		
		LS 2 – 3 L3	1,14	202		

Die maximale Schleifenimpedanz wird bei den Spannungsabgriffen an der Tür des Labordemonstrators überschritten. Diese Abgriffe sind ohnehin nicht für den maximalen Strom des Abganges dimensioniert, sondern für maximal 16 A daher kann eine leichte Überschreitung der Schleifenimpedanz vernachlässigt werden. Im Zuge dieser wird mit dem Installationstester ebenso die Richtigkeit die Phasenfolge des Außenleiters kontrolliert.

4.3.2.2 Durchgängigkeit des Schutzleiters

Gemäß ÖVE/ÖNORM E 8701-1:2003-01-01 [42] ist der Schutzleiter einer Niederohmmessung zu unterziehen wobei folgende Grenzwerte einzuhalten sind:

0,5 Ω für Leuchten und 0,3 Ω für andere Geräte mit Anschlussleitungen bis zu 5 m Länge, zuzüglich 0,1 Ω für jede weitere Länge von 7,5 m, bis zu einem Maximalwert von 1,0 Ω .

Bei der Niederohmmessung liegen alle Werte innerhalb der normativen Grenzen. Der höchste Wert von 0,09 Ω wurde am Schutzleiterabgriff am Ausgang LS 2-2 an der unteren Verteilertür gemessen. Tabelle 18 zeigt die gemessene Schutzleiterwiderstände. Die Messungen werden zwischen der installierten Potenzialausgleichsschiene und den Abgängen durchgeführt.

Tabelle 18: Schutzleiterwiderstand

Abgang	Schutzleiterwiderstand
-	Ω
LS2-1	0
LS2-2	0
LS2-3	0
LS2-4	0
LS3-1	0.01
LS3-2	0
LS3-3	0
LS 2-1 Tür	0.05
LS 2-2 Tür	0.09
LS 2-3 Tür	0.02
LS 2-4 Tür	0.04
LS 3-1 Tür	0.05
LS 3-2 Tür	0.02
LS 3-3 Tür	0.02
Hutschiene 1	0
Hutschiene 2	0
Hutschiene 3	0
Hutschiene 4	0
Hutschiene 5	0.04
Hutschiene obere Tür	0.04
Hutschiene untere Tür	0.07
Hutschiene Netzteil	0.01
Eingang	0

4.3.3 Strom- und Spannungsmessung

In Kapitel 3.2.1 sind die Messtoleranzen der in den Leistungsschaltern integrierten Rogowskispulen mit 1 % in einem Wertebereich vom 0,08- bis zum 2-fachen Strom der Baugröße I_b angegeben. Für die installierten LS ergibt sich daraus ein Wertebereich von 8 A bis 200 A (außerhalb dieses Wertebereichs sind keine Toleranzen angegeben). Zur Überprüfung dieser Toleranzen wird ein Versuchsaufbau mit drei steuerbaren Lasten an den Labordemonstrator angeschlossen. Die Messwerte des LS werden mit der zuvor erwähnten Fluke Stromzange (siehe Tabelle 15, Pos. 8) und mit drei Stromzangen (siehe Tabelle 15, Pos. 3 bis Pos. 6) in Kombination mit einem Dewetron Mehrkanalmesssystem samt des Messmodules (siehe Tabelle 15, Pos. 1 und 2) verglichen und in Tabelle 19 gegenübergestellt. Alle Werte außerhalb des Toleranzbereichs sind rot markiert. Weiters ist zu erwähnen, dass Ströme unter 1 A für den LS nicht messbar sind und daher mit 0 A dargestellt werden.

Tabelle 19: Relative Messfehler der Messwerte bei Strommessungen

Vergleich	Last	Relative Messfehler f der Strommesswerte		
-	A	%		
Dewetron/LS	4,4	0.0	-2.4	-2.4
LS/Fluke		-0.7	0.5	0.7
Dewetron/Fluke		-0.7	-1.9	-1.7
Dewetron/LS	8,9	-1.2	0.0	0.0
LS/Fluke		-0.2	-0.7	0.0
Dewetron/Fluke		-1.5	-0.7	0.0
Dewetron/LS	13,3	0.0	0.0	0.0
LS/Fluke		-1.7	-2.2	-2.0
Dewetron/Fluke		-2.5	-2.2	-2.9
Dewetron/LS	17,8	0.0	-0.6	0.0
LS/Fluke		-2.7	-2.8	-2.8
Dewetron/Fluke		-2.7	-3.5	-2.8
Dewetron/LS	22,2	0.0	0.0	0.0
LS/Fluke		-2.1	-1.7	-2.3
Dewetron/Fluke		-2.1	-1.7	-2.3

Tabelle 20 zeigt die Messabweichungen der in den Leistungsschaltern integrierten Spannungswandler im Vergleich zu den Referenzmessungen. Bei der Spannungsmessung der LS beträgt die Toleranz ebenfalls 1 %, der Wertebereich für die Spannung liegt jedoch zwischen 40 V und 480 V.

Tabelle 20: Relative Messfehler der Messwerte bei Spannungsmessungen

Vergleich	Last	Relative Messfehler f der Spannungsmesswerte		
-	A	%		
Dewetron/LS	4,4	-0.4	-0.8	-0.6
LS/Multimeter		0.5	0.3	0.2
Dewetron/Multimeter		0.1	-0.5	-0.4
Dewetron/LS	8,9	0.0	0.0	0.0
LS/Multimeter		-0.2	0.0	-0.2
Dewetron/Multimeter		-1.4	0.3	0.2
Dewetron/LS	13,3	0.0	0.0	0.0
LS/Multimeter		0.0	-0.7	-0.4
Dewetron/Multimeter		0.4	-0.6	-1.0
Dewetron/LS	17,8	-0.9	0.4	0.4
LS/Multimeter		0.0	0.1	0.0
Dewetron/Multimeter		-0.8	0.5	0.3
Dewetron/LS	22,2	0.1	0.0	0.1
LS/Multimeter		-1.2	-0.5	-0.6
Dewetron/Multimeter		-1.1	-0.5	-0.5



Zur Berechnung des relativen Messfehlers f wird die nachfolgende Formel (2) verwendet, die zugehörigen Messwerte der einzelnen Ströme und Spannungen befinden sich im Anhang (Kapitel 7.4.1.). Dieses Rechenbeispiel zeigt die Berechnung für den grün markierten Wert aus Tabelle 19.

$$f = \frac{(I_{2_LS} - I_{2_Dewetron})}{I_{2_LS}} \cdot 100 \% = \frac{16,4 \text{ A} - 16,5 \text{ A}}{16,4 \text{ A}} \cdot 100 \% = -0,6 \% \quad (2)$$

4.3.4 Kennlinie und Meldungsübersicht der Leistungsschalter

In Kapitel 2.6.4 werden die Anzeigemöglichkeiten der powerconfig Software erläutert. Abbildung 34 zeigt die Kennlinie des LS 3 mit den kleinsten Auslösewerten. Es ist erkennbar, dass der Leistungsschalter bei einem Strom von 12,4 A innerhalb von 11,7 s auslösen soll.

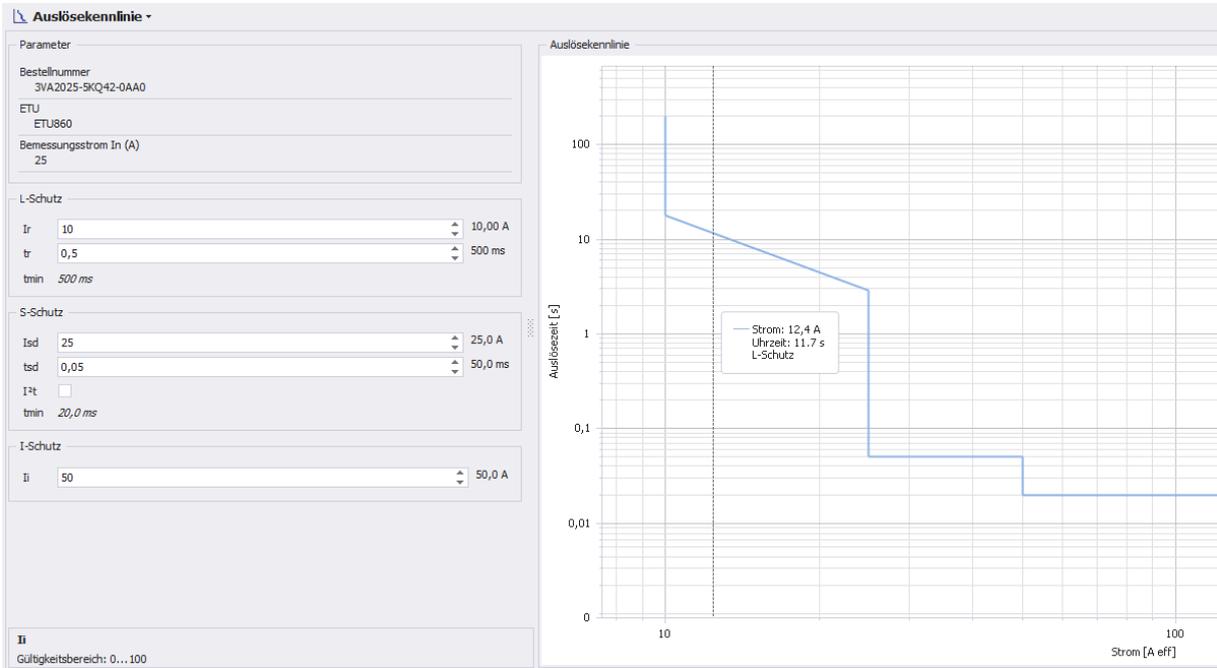


Abbildung 34: Minimale Auslösekennlinie des LS 3 mit einer Auslösezeit von 11,7 s bei 12,4 A

Abbildung 35 zeigt eine Übersicht der Schalterstellungen der vier LS mit dem jeweils eingestellten Ansprechwert und dem höchsten Strom je Phase. In dem dargestellten Moment befindet sich LS 3 im Überlastbereich und löst nach 11,7 s aus.

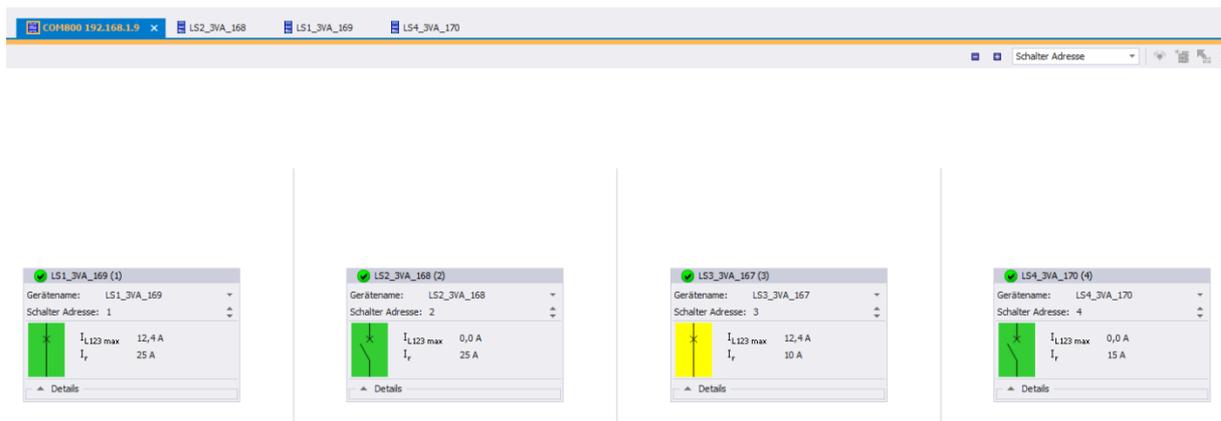


Abbildung 35: Überblick der vier Leistungsschalter in powerconfig

In der folgenden Abbildung 36 ist die Auslösung des LS 3 in powerconfig aufgrund der roten Hintergrundfarbe und dem gelben Überstromdreieck erkennbar.

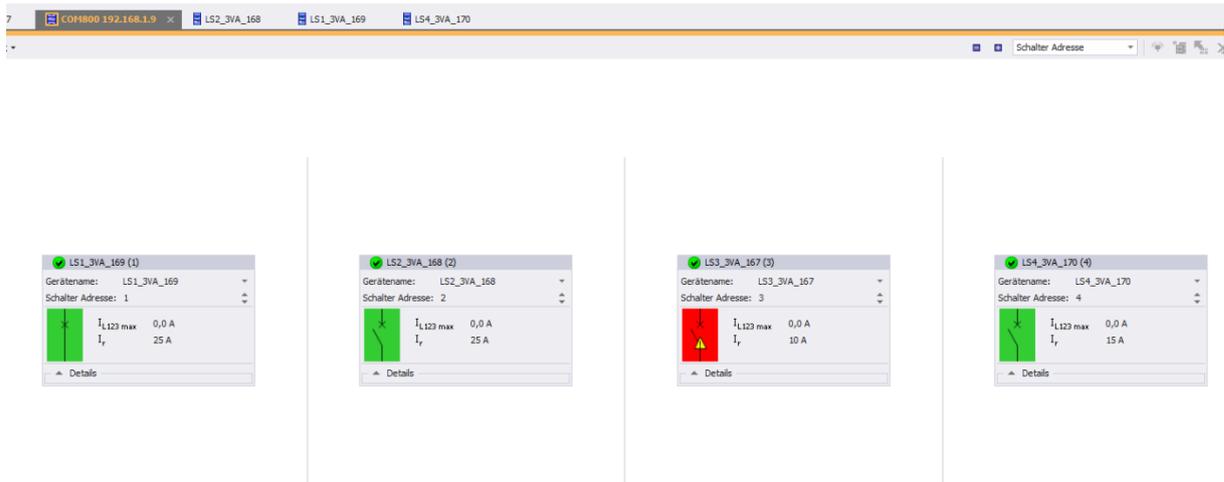


Abbildung 36: Überblick der 4 LS in powerconfig mit Auslösung des LS 3

Der Grund für die Auslösung, in diesem Fall die Überlastauslösung in der Phase L3, wird mit dem in Abbildung 37 dargestellten Meldungsübersicht angezeigt. Außerdem zeigt diese Ansicht die zuletzt gemessenen gerundeten Ströme in allen Phasen.

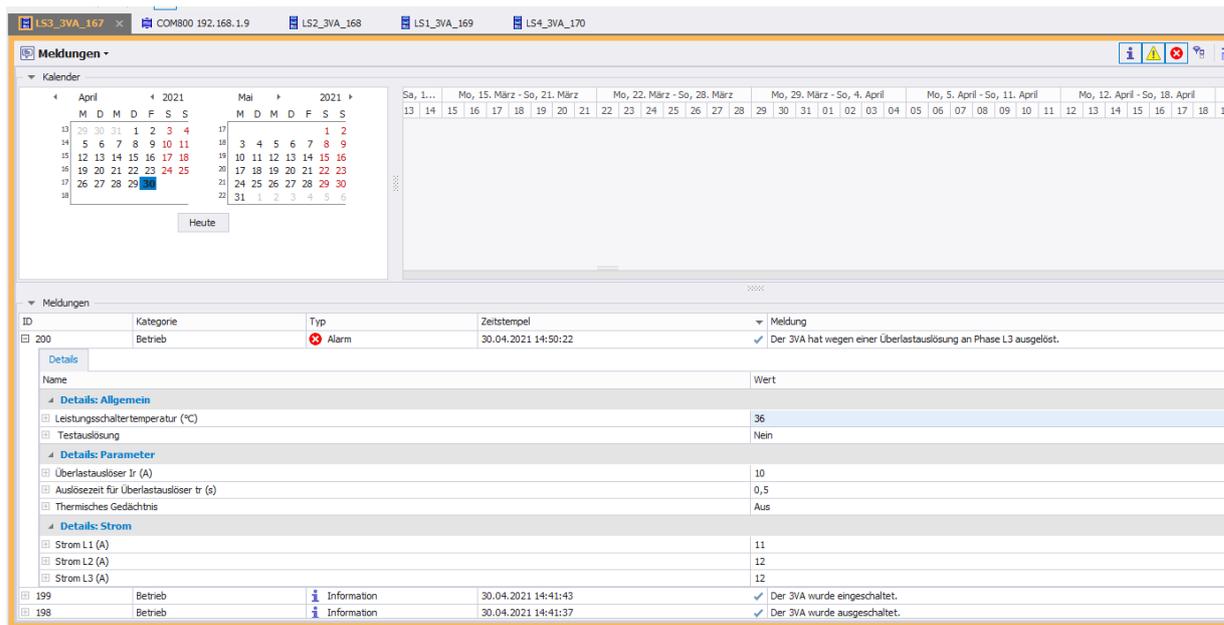


Abbildung 37: Meldeübersicht des LS 3 aus der powerconfig Software

Bei einer Einstellung von I_r auf 11,5 A zeigt der LS, wie in Abbildung 38 zu erkennen ist, bei einem Stromwert in Phase L2 von 12,4 A lediglich eine Warnung an und löst nicht aus. Dies lässt sich mit der Toleranz des Leistungsschalters, welcher demnach erst ab einem Strom von 1 A oberhalb von I_r auslöst, begründen. Ein Nachteil dieser Ansicht ist, dass der Überlastbereich auf eine ganze Zahl aufgerundet wird, wie bereits in der Meldungsübersicht erwähnt. Daher wird in diesem Fall eine Grenze von 12 A angezeigt, obwohl diese auf 11,5 A eingestellt ist.



Abbildung 38: Warmmeldung des LS 3 im Überlastbereich

4.3.5 Unsymmetrische Stromaufteilung je Phase

Bei der Inbetriebnahme des Labordemonstrators traten Auffälligkeiten in der Verteilung des Stroms je Phase im geschlossenen Ring (d.h. alle vier Leistungsschalter geschlossen) auf. Um die Ursache für dieses Phänomen zu ermitteln, wurde eine Niederohmmessung der einzelnen Strompfade mit dem bereits beschriebenen Installationstester (siehe Tabelle 15, Pos. 8) durchgeführt. Die Messungen ergaben Werte zwischen 0 mΩ und 50 mΩ je Pfad. Sämtliche zugehörige Messwerte sind dem Anhang (Kapitel 7.4.2) zu entnehmen. Tabelle 21 zeigt die Messergebnisse für die größte Abweichung zwischen dem Strom I_3 und Strom I_1 (gemessen am Ausgang von LS 2) von -52,2 %. In diesem Fall befindet sich die symmetrische Last mit 8,3 A je Phase am Abzweig LS 3-2. Die prozentuelle Abweichung bezieht sich auf den Strom in Phase L1 weshalb in Tabelle 21 für den Strom I_1 immer eine Abweichung von 0 % angegeben wird.

Tabelle 21: Maximal auftretende unsymmetrische Stromaufteilung je Phase

Stromaufteilung	I_1	I_2	I_3
	%	%	%
LS 1	0.0	-1.2	-1.2
LS 2	0.0	26.1	-52.2
LS 3	0.0	-11.9	18.6
LS 4	0.0	21.7	-52.2

Die prozentuelle Abweichung der Ströme je Phase wird gemäß Formel (3) berechnet, die zugehörigen Messwerte der Ströme befinden sich im Anhang (Kapitel 7.4.3). Dieses Rechenbeispiel zeigt die Berechnung für den grün markierten Wert aus Tabelle 21.

$$\text{Stromaufteilung} = \frac{(I_1 - I_2)}{I_1} \cdot 100 \% = \frac{2,3 \text{ A} - 1,7 \text{ A}}{2,3 \text{ A}} \cdot 100 \% = 26,1 \% \quad (3)$$



5 Zusammenfassung und Ausblick

Das primäre Ziel dieser Arbeit liegt in der Entwicklung, Konstruktion und Inbetriebnahme eines Labordemonstrators mit Hilfe dessen Versuche zum Konzept der automatisierten Netzrekonfiguration sowie Laborversuche zum Thema Selektivität, Netztopologien oder Niederspannungsschaltgeräte durchgeführt werden können. Weiters wird im Zuge dieser Masterarbeit auf die normativen und gesetzlichen Aspekte bei der Errichtung einer Niederspannungs-Schaltgerätekombination eingegangen, sodass zukünftig ein dementsprechender Leitfaden am Institut verfügbar ist. Dazu werden in Kapitel 2.8 die entsprechend notwendigen Grundlagen diskutiert. In Kapitel 3 werden die wichtigsten Punkte in Bezug der Planung und Auswahl der Komponenten erläutert. Dabei gilt für die nachfolgenden Versuche und Messungen, dass die dort erwähnten Grenzwerte der einzelnen Betriebsmittel und Komponenten in keinem Fall überschritten werden. In Kapitel 4 wird das Konzept sowie der Aufbau des angefertigten Labordemonstrators respektive Verteilers beleuchtet und die Erstinbetriebnahme samt den zugehörigen Messungen bzw. Prüfungen zusammengefasst.

Besondere Vorsicht gilt bei den nicht abgesicherten Abgängen, da dort nur die Leistungsschalter als Fehlerschutz vorhanden sind und kein Zusatzschutz. Daher muss gewährleistet sein, dass sich eine Fehlerstromschutzeinrichtung vorm Anschluss des Labordemonstrators, oder direkt nach dem nicht abgesicherten Abgang befindet.

Der maximale relative Messfehler zwischen den Messgeräten aus Kapitel 4.3.3 liegt beim Vergleich der powerconfig Software mit der Stromzange (Type 345 PQ Fabrikat Fluke) bei -2,8 %. Bei der Spannungsmessung ergibt sich eine maximale Abweichung beim Vergleich des LS mit dem Multimeter (Type METRAHIT Fabrikat GOSSEN METRAWATT) von -1,2 %. Aufgrund dieses geringen Messfehlers können die inkludierten Rogowskispulen der LS für die zukünftigen Messungen und Versuche ohne zusätzliche Messgeräte herangezogen werden.

Die unsymmetrische Aufteilung der Ströme je Phase im vermaschten Betrieb (Ringstruktur) bei einer an sich symmetrischen Prüflast aus Kapitel 4.3.5 kann unter anderem durch marginale Unterschiede der Impedanzen der einzelnen Phasen bzw. Strompfade begründet werden. Für eine genauere Verifikation der Ergebnisse kann eine Strom-Spannungsmessung durchgeführt werden.

Bei der Inbetriebnahme des Verteilers wurde als weiteres Phänomen die Kopplung der aktiven (eingesicherte) Abgänge mit den nicht aktiven (nicht eingesicherte) Abgängen identifiziert. Dabei träten bei einer Strangbelastung am Abgang LS 3 – 1 (LS 1 ein und LS 3 ein) in den Abgängen LS 2 - 1 bis LS 2 – 4 eine Spannungserhöhung von maximal 8 V auf was somit keine Gefahr für das Bedienpersonal darstellt.

Als großes Defizit der Software kann identifiziert werden, dass diese keine Ströme unter 1 A anzeigt (u.a. abhängig von den Messbereichen der in den Leistungsschaltern integrierten Stromwandler) und Messwerte des Öfteren auf ganze Zahlen gerundet werden. Der Strom über den Schutzleiter bzw. das Erdreich kann vom LS nicht aktiv gemessen werden, weshalb dieser rechnerisch ermittelt wird. Dies kann beispielsweise bei einer unsymmetrischen



Stromaufteilung zu einer Anzeige eines entsprechenden Erdschlussstroms führen, obwohl keiner vorhanden sein dürfte. Die Stromwerte für die LS-Kennlinie können lediglich in 0,5-A-Schritten konfiguriert werden und die tatsächliche Auslösung des Überlastbereichs liegt um 1 A über dem entsprechend eingestellten Wert.

Darüber hinaus konnten im Zuge der Erstinbetriebnahme sowie der daran angeknüpften Prüfungen keine schweren Mängel festgestellt werden. Aufgrund dessen kann dieser für weiterführende Versuche im Zuge von Forschungsprojekten am Institut sowie für entsprechende Laborübungen verwendet werden. Weiters wird in einer nachfolgenden Masterarbeit die Kommunikation des Labordemonstrators bzw. der darin verbauten Leistungsschalter mittels Fremdsoftware (zB Python) implementiert, siehe dazu [30].



6 Literatur

- [1] Heuck, K., Detterman, K., Schulz, D. Elektrische Energieversorgung Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis, 9. Auflage, Springer Verlag, 2013.
- [2] Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, #mission2030 - Die österreichische Klima- und Energiestrategie, Wien, 2018.
- [3] Herbst, D., Schürhuber, R., Lagler, M., et al., Low-voltage Grids in Transition – Automatic Grid Reconfiguration Approach for Future Smart Grids Challenges, CIRED, 2021 (eingereicht).
- [4] „Homepage der Austrian Power Grid AG, <https://www.apg.at/>, [online],“ [Zugriff am 5.5.21].
- [5] Panos, K., Praxisbuch Energiewirtschaft Energieumwandlung, -transport und beschaffung, Übertragungsnetzausbau und Kernenergieausstieg, 4. Auflage, Springer Verlag, 2017.
- [6] Schwab, A., J., Elektroenergiesysteme, Smarte Stromversorgung im Zeitalter der Energiewende, 6. Auflage, Springer Verlag, 2020.
- [7] „Siemens AG, Gerätehandbuch SENTRON Kompaktleistungsschalter mit IEC-Zertifikat,“ 03/2019.
- [8] OVE E 8101 - Elektrische Niederspannungsanlagen, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.01.2019.
- [9] Schmutzger, E., Schutzmaßnahmen in elektrischen Anlagen, Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung, LV-Nr. 432.151, Graz: Technische Universität Graz, Institut für elektrische Anlagen und Netze, 2014.
- [10] TAEV 2020 Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an öffentliche Versorgungsnetze mit Betriebsspannungen bis 100 Volt, mit Erläuterungen der einschlägigen Vorschriften, Bundeseinheitliche Fassung oesterreichs energie in Kooperation mit OVE, Österreichs E-Wirtschaft, Brahmplatz 3, 1040 Wien, 2020.
- [11] DIN IEC/TS 60479-1 - Wirkungen des elektrischen Stromes auf Mensch und Nutztiere - Teil 1: Allgemeine Aspekte, Berlin: VDE VERLAG GMBH,, 05.2007.
- [12] OVE EN 61140 - Schutz gegen elektrischen Schlag - Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.12.2016.



- [13] Böker, A., Paerschke, H., Boggash, E., Elektrotechnik für Gebäudetechnik und Maschinenbau, Springer Verlag, 2018.
- [14] IEC 62955 - Residual direct current detecting device (RDC-DD) to be used for mode 3, 03.2018.
- [15] Siemens AG, Grundlagen der Niederspannungs_Schalttechnik, 2008.
- [16] ÖVE/ÖNORM EN 60269-1 - Niederspannungssicherungen Teil 1 Allgemeine Anforderungen, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.06.2015.
- [17] OVE EN 60947-2 - Niederspannungsschaltgeräte Teil 2: Leistungsschalter, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.12.2020.
- [18] Herbst, D., A contribution to new approaches in low voltage protection (working title), PhD thesis, Graz University of Technology, in progress.
- [19] AIT Austrian Institute of Technology, Projektbeschreibung für Projektantrag 867276 - "PoSyCo - Power System Cognification", Wien, 2015..
- [20] Bundesgesetz über Sicherheitsmaßnahmen, Normalisierung und Typisierung auf dem Gebiete der Elektrotechnik (Elektrotechnikgesetz 1992 – ETG 1992), Wien: Österreichisches Bundeskanzleramt, www.ris.bka.gv.at, StF: BGBl. Nr. 106/1993, idF BGBl. I Nr. 27/2017.
- [21] Verordnung über den Schutz der Arbeitnehmer/innen vor Gefahren durch den elektrischen Strom (Elektroschutzverordnung 2012 – ESV 2012) Wien: Österreichisches Bundeskanzleramt, www.ris.bka.gv.at, StF: BGBl. II Nr. 33/2012.
- [22] Verordnung der Bundesministerin für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort über Sicherheit, Normalisierung und Typisierung elektrischer Betriebsmittel und elektrischer Anlagen (Elektrotechnikverordnung 2020 – ETV 2020), Wien: Österreichisches Bundeskanzleramt, www.ris.bka.gv.at, StF: BGBl. II Nr. 308/2020.
- [23] ÖVE/ÖNORM EN 61439-1 - Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen Teil 1: Allgemeine Festlegung, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.07.2012.
- [24] ÖVE/ÖNORM EN 60529 - Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code), Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.11.2014.
- [25] ÖVE/ÖNORM EN 60073 - Grund- und Sicherheitsregeln für die Mensch-Maschine-Schnittstelle, Kennzeichnung – Codierungsgrundsätze für Anzeigegeräte und Bedienteile, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.07.2003.
- [26] ÖVE/ÖNORM EN 50274 - Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen – Schutz gegen elektrischen Schlag – Schutz gegen unabsichtliches direktes Berühren gefährlicher aktiver Teile, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.01.2010.



- [27] ÖVE/ÖNORM EN 60947-1 - Niederspannungsschaltgeräte Teil 1: Allgemeine Festlegung, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.10.2015.
- [28] ÖVE/ÖNORM EN 62208 - Leergehäuse für Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen – Allgemeine Anforderungen, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.07.2012.
- [29] OVE EN 60898-1 - Elektrisches Installationsmaterial – Leitungsschutzschalter für Hausinstallationen und ähnliche Zwecke Teil 1: Leitungsschutzschalter für Wechselstrom (AC), Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.02.2021.
- [30] Griesser, R., Weiterentwicklung und Adaption eines Kompaktleistungsschalter-Labordemonstrators (Arbeitstitel), Masterarbeit, TU Graz, laufend..
- [31] Siemens AG, Kommunikationshandbuch SENTRON Kompaktleistungsschalter 3VA mit IEC- und UL-Zertifizierung, pdf, 08/2017.
- [32] Datenblätter 4/6 mm Laborsicherheitsbuchsen, <https://www.staubli.com/de-at/>, [online], [Zugriff am 24.11.20].
- [33] Datenblätter der Siemens Komponenten, <https://new.siemens.com/at/de.html> [online],, [Zugriff am 02.11.20].
- [34] Datenblätter Sicherungslasttrennschalter, FI und Leitungsschutzschalter, <https://www.schrack.at/>, [online], [Zugriff am 18.11.20].
- [35] Datenblätter der Leistungssteckverbindung, <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/pc>, [online], [Zugriff am 30.11.20].
- [36] ÖVE-EN 1 Teil 3 - Errichtung von Strakstromanlagen mit Nennspannungen bis ~ 1 000 V und = 1500 V, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 03.1995.
- [37] Datenblatt Dewetron TRION -2402-V, <https://www.dewetron.com/de/messtechnik-produkte/messverstaerker/trion-module/>, [online], [Zugriff am 13.05.2021].
- [38] Datenblatt Stromzange Chauvin Arnoux MN 38, https://catalog.chauvin-arnoux.at/at_de/mn38.html, [online], [Zugriff am 10.05.21].
- [39] Datenblatt Multimeter GOSSEN METRAWATT METRAHIT ENERGY, <https://www.gmc-instruments.de/produkte/mess-und-prueftechnik/multimeter-handkalibratoren/spezielle-anwendungen/multimeter-fuer-leistungs-und-energiemessung/metrahit-energy/>, [online], [Zugriff am 13.05.21].
- [40] Datenblatt Fluke Stromzange 345 PQ ,<https://www.fluke.com/de-at/produkt/elektrische-pruefungen/netzqualitaet/345>, [online], [Zugriff am 12.05.21].
- [41] OVE_EN_61008-1 - Fehlerstrom-/Differenzstrom-Schutzschalter ohne eingebauten Überstromschutz (RCCBs) für Hausinstallation und für ähnliche Anwendungen Teil 1:Allgemeine Anforderung, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.04.2018.



- [42] ÖVE/ÖNORM E 8701-1 - Prüfung nach Instandsetzung und Änderung und Wiederkehrende Prüfung elektrischer Geräte Teil1:Allgemeine Anforderungen, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.01.2003.
- [43] Datenblatt Systemumschalter KG105.K950.E, https://www.krausnaimer.com/at_de, [online], [Zugriff am 06.11.20].
- [44] Datenblatt Verteiler DH F5 1080-850/470, <https://www.elsta.com/>, [online], [Zugriff am 23.11.21].



7 Anhang

7.1 Datenblätter

7.1.1 Leistungsschalter 3VA2025-5KQ42-0AA0 [33]

SIEMENS

Datenblatt

3VA2025-5KQ42-0AA0



Leistungsschalter 3VA2 IEC Frame 100 Schaltvermögenklasse M
 $I_{cu}=55\text{kA}$ @ 415V 4-polig, Anlagenschutz ETU860, LSIG, $I_n=25\text{A}$
 Überlastschutz $I_r=10\text{A}...25\text{A}$ Kurzschlusschutz $I_{sd}=0,6..10 \times I_n$, $I_i=1,5..12 \times I_n$
 N-Leiterschutz einstellbar (OFF, bis 160%) Erdschlusschutz, abschaltbar $I_g=0,2...1 \times I_n$ $t_g=0,05-0,8\text{s}$ Schraubenflächenschluss

Ausführung	
Produkt-Markennamen	SENTRON
Produkt-Bezeichnung	Kompaktleistungsschalter
Ausführung des Produkts	Anlagenschutz
Ausführung des Überstromauslösers	ETU860
Schutzfunktion des Überstromauslösers	LSIG
Polzahl	4
Allgemeine technische Daten	
Bemessungsisolationsspannung U_i	800 V
Verlustwirkleistung / bei Bemessungsstrom / im Betriebszustand / je Gerät / AC	0,84 W
Verlustleistung / bei Bemessungsstrom / bei AC / je Phasenpol / in Betriebszustand	0,28 W
mechanische Lebensdauer (Schaltspiele) / typisch	20 000
Elektrische Lebensdauer (Schaltspiele) / bei AC-1 / bei 380/415 V 50/60 Hz	14 000
Elektrische Lebensdauer (Schaltspiele) / bei AC-1 / bei 690 V 50/60 Hz	8 000
N-pol Schutz nachrüstbar	Nein
Ausführung der Erdschlussüberwachung	Summenstrombildung L + N - Leiter
Produktfunktion	
• Kommunikationsfunktion	Ja
• sonstige Messfunktion	Ja
Nettogewicht	2,95 kg
Strom	
Betriebsstrom	
• bei 40 °C	25 A
• bei 45 °C	25 A
• bei 50 °C	25 A
• bei 55 °C	25 A
• bei 60 °C	25 A
• bei 65 °C	25 A
• bei 70 °C	25 A
Schaltvermögen gemäß IEC 60947	
Schaltvermögensklasse des Leistungsschalters	M
Ausschaltvermögen Grenzkurzschlussstrom (I_{cu})	
• bei 240 V	85 kA
• bei 415 V	55 kA



• bei 440 V	55 kA
• bei 500 V	36 kA
• bei 690 V	2 kA
Ausschaltvermögen Betriebskurzschlussstrom (Ics)	
• bei 240 V	85 kA
• bei 415 V	55 kA
• bei 440 V	55 kA
• bei 500 V	36 kA
• bei 690 V	2 kA
Einschaltvermögen Kurzschlussstrom (Icm)	
• bei 240 V	187 kA
• bei 415 V	121 kA
• bei 440 V	121 kA
• bei 500 V	76 kA
• bei 690 V	3 kA
Einstellbare Parameter	
einstellbarer Ansprechwert Strom / Ir min.	10 A
einstellbarer Ansprechwert Strom / Ir max.	25 A
einstellbarer Ansprechwert Zeit / tr min.	0,5
einstellbarer Ansprechwert Zeit / tr max.	25
einstellbarer Ansprechwert Strom / Isd min.	15 A
einstellbarer Ansprechwert Strom / Isd max.	250 A
einstellbarer Ansprechwert Zeit / tsd min.	0,05 s
einstellbarer Ansprechwert Zeit / tsd max.	0,5 s
einstellbarer Ansprechwert Zeit / tsd min.	0,05 s
einstellbarer Ansprechwert Zeit / tsd max.	0,5 s
einstellbarer Ansprechwert Strom / Ii min.	38 A
einstellbarer Ansprechwert Strom / Ii max.	300 A
Ausführung des N-Leiterschutzes	einstellbar OFF; 40% bis 160%
Erdschlusschutzfunktion G / Kennlinientype umschaltbar / I2t=ON/OFF	Ja
einstellbarer Ansprechwert Strom / Ig min.	15 A
einstellbarer Ansprechwert Strom / Ig max.	25 A
einstellbarer Ansprechwert Zeit / tg min.	0,05 s
einstellbarer Ansprechwert Zeit / tg max.	0,8 s
einstellbarer Ansprechwert Strom / bei G-Auslösung / bei I2t-Kennlinie / min.	0,6 A
einstellbarer Ansprechwert Strom / bei G-Auslösung / bei I2t-Kennlinie / max.	1 A
Mechanischer Aufbau	
Höhe [in]	7,1 in
Höhe	181 mm
Breite [in]	5,5 in
Breite	140 mm
Tiefe [in]	3,4 in
Gesamttiefe	86 mm
Anschlüsse	
Anordnung des elektrischen Anschlusses / für Hauptstromkreis	vorderseitiger Anschluss
Ausführung des elektrischen Anschlusses / für Hauptstromkreis	beidseitiger Schraubenfachanschluss
Anschlussquerschnitt, Schraubenfachanschluss; Breite x Dicke; min.	13 x 1 mm
Anschlussquerschnitt, Schraubenfachanschluss; Breite x Dicke; max.	25 x 8,5 mm
Ausführung der Oberfläche / der Anschlüsse / auf Schalteroberseite (N, 1, 3, 5)	Zinn
Ausführung der Oberfläche / der Anschlüsse / auf Schalterunterseite (N, 2, 4, 6)	Zinn
Hilfsstromkreis	



Anzahl der Wechsler / für Hilfskontakte	0
Zubehör	
Produktweiterung / optional / Motorantrieb	Ja
Umgebungsbedingungen	
Schutzart IP / frontseitig	IP40
<ul style="list-style-type: none"> • Umgebungstemperatur / während Betrieb / minimal • Umgebungstemperatur / während Betrieb / maximal • Lagertemperatur / minimal • Lagertemperatur / maximal 	<p>-25 °C</p> <p>70 °C</p> <p>-40 °C</p> <p>80 °C</p>
Approbationen Zertifikate	
Betriebsmittelkennzeichen / gemäß DIN EN 81346-2	Q
allgemeine Produktzulassung	EMV (Elektromagnetisch Verträglichkeit)



[Sonstige](#)



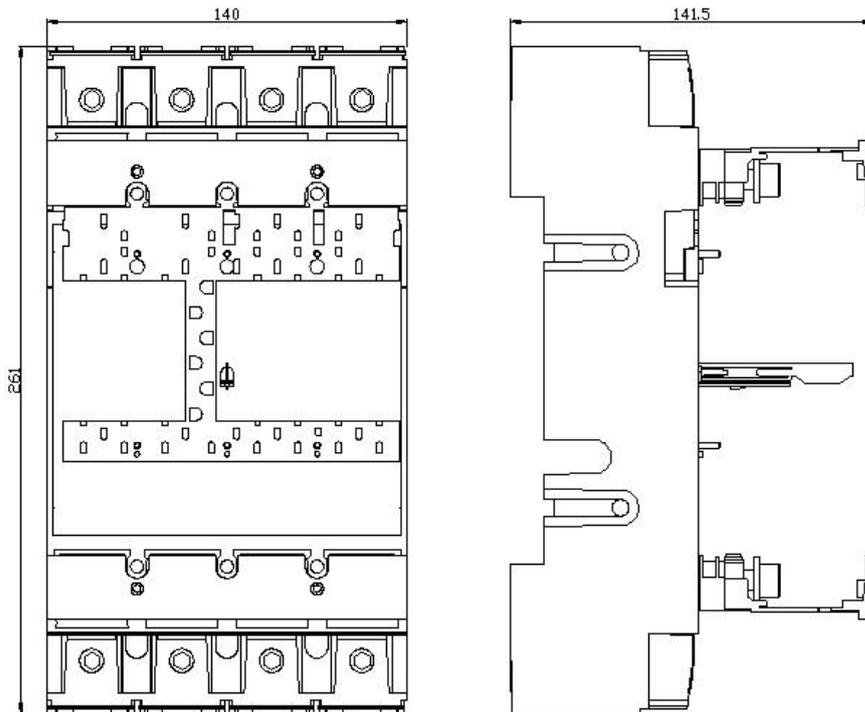
Konformitätserklär.	Prüfbescheinigungen	Schiffbau
	<p>Typprüfbescheinigung/Werkzeugprüfbescheinigungen</p> <p>sonstige Prüfbescheinigungen</p>	<p>Sonstige</p>

Schiffbau	sonstiges
	<p>CCS / China Classification Society</p> <p>Herstellereklärung</p> <p>Sonstige</p>

Weitere Informationen
<p>Information- and Downloadcenter (Kataloge, Broschüren,...) http://www.siemens.de/lowvoltage/kataloge</p> <p>Industry Mall (Online-Bestellsystem) https://mall.industry.siemens.com/mall/de/de/Catalog/product?mlfb=3VA2025-5KQ42-0AA0</p> <p>Service&Support (Handbücher, Betriebsanleitungen, Zertifikate, Kennlinien, FAQs,...) https://support.industry.siemens.com/cs/ww/de/ps/3VA2025-5KQ42-0AA0</p> <p>Bilddatenbank (Produktfotos, 2D-Maßzeichnungen, 3D-Modelle, Geräteschaltpläne, ...) http://www.automation.siemens.com/bilddb/cax_de.aspx?mlfb=3VA2025-5KQ42-0AA0</p> <p>CAX-Online-Generator http://www.siemens.com/cax</p> <p>Ausschreibungstexte (Leistungsverzeichnisse) http://www.siemens.de/ausschreibungstexte</p>



7.1.2 Leistungsschalter Sockel [33]





7.1.3 Synchronisierungsfähiger Motorantrieb [33]

SIEMENS

Datenblatt

3VA9267-0HC15

Synchronisierungsfähiger Motorantrieb 24V DC incl. COM Zubehör für:
3VA2 100/160/250



Ausführung	
Produkt-Markename	SETRON
Produkt-Bezeichnung	Zubehör
Ausführung des Produkts	SEO-Motorantrieb
Spannung	
Spannungsart zur Betätigung	DC
Bemessungsbetriebsleistung	300 V·A
Mechanischer Aufbau	
Bemessungssteuerspeisespannung U_s bei DC	24 V
Höhe	118,7 mm
Breite	104,6 mm
Gesamttiefe	162,8 mm
anschließbarer Leiterquerschnitt / eindrätig mm ²	
• minimal	1,5 mm ²
• maximal	1,5 mm ²
anschließbarer Leiterquerschnitt / feindrätig mm ² mit Aderendhülse	
• minimal	1,5 mm ²



<ul style="list-style-type: none"> • maximal 	1,5 mm ²
anschließbarer Leiterquerschnitt / mehrdrähtig mm ²	
<ul style="list-style-type: none"> • minimal • maximal 	1,5 mm ² 1,5 mm ²
Umgebungstemperatur / während Betrieb	
<ul style="list-style-type: none"> • minimal • maximal 	-25 °C 70 °C
Lagertemperatur	
	-40 ... +80
Anzugsdrehmoment	
<ul style="list-style-type: none"> • minimal • maximal 	0,18 N·m 0,22 N·m

Anschlüsse gemäß IEC	
Abisolierlänge	6 mm

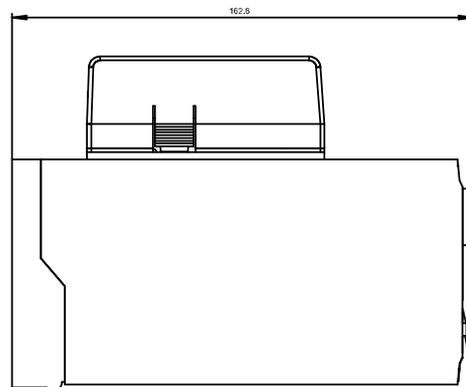
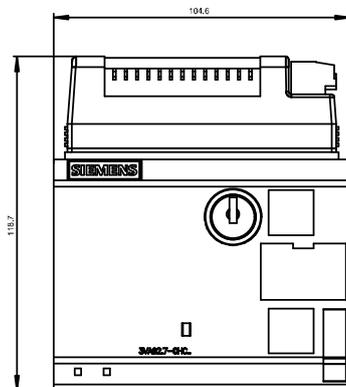
Approbationen Zertifikate

allgemeine Produktzulassung	EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit)	Konformitätserklärung	Schiffbau	sonstiges
Sonstige				Herstellereklärung
	RCM	EG-Konf.	LRS	

sonstiges
Sonstige

Weitere Informationen

- Information- and Downloadcenter (Kataloge, Broschüren,...)**
<http://www.siemens.de/lowvoltage/kataloge>
- Industry Mail (Online-Bestellsystem)**
<https://mall.industry.siemens.com/mall/de/de/Catalog/product?mlfb=3VA9267-0HC15>
- Service&Support (Handbücher, Betriebsanleitungen, Zertifikate, Kennlinien, FAQs,...)**
<https://support.industry.siemens.com/cs/ww/de/ps/3VA9267-0HC15>
- Bilddatenbank (Produktfotos, 2D-Maßzeichnungen, 3D-Modelle, Geräteschaltpläne, ...)**
http://www.automation.siemens.com/bilddb/cax_de.aspx?mlfb=3VA9267-0HC15
- CAX-Online-Generator**
<http://www.siemens.com/cax>
- Ausschreibungstexte (Leistungsverzeichnisse)**
<http://www.siemens.de/ausschreibungstexte>





7.1.4 Systemumschalter KG105.K950.E [43]

KG105/KG105C Elektrische Werte

nach IEC 60947-3, EN 60947-3, VDE 0660 Teil 107



Bemessungsdauerstrom $I_{u}/I_{th}/I_{the}$		A	125			
Bemessungsisolationsspannung U_i ¹		V	690			
Bemessungsstoßspannungsfestigkeit U_{imp}		kV	6			
Bemessungsbetriebsstrom I_c		A	125			
AC-21A	Schalten von ohmscher Last mit geringer Überlast	220 V–500 V	125			
AC-22A	Schalten von gemischter ohmscher und induktiver Last mit geringer Überlast	660 V–690 V	90			
Bemessungsschaltleistung						
AC-3	Direktanlassen von Käfigläufermotoren, Ausschalten während des Laufes	3-phasig, 3-polig	220 V–240 V 380 V–440 V 500 V 660 V–690 V	22 37 45 22		
		AC-23A	Häufiges Schalten von Motoren oder anderer hochinduktiver Verbraucher	3-phasig, 3-polig	220 V–240 V 380 V–440 V 500 V 660 V–690 V	25 45 55 30
				ein- bzw. mehrdrähtig	mm ²	50
Kurzschlussfestigkeit						
Max. Vorsicherung		gG-Charakteristik	A	125		
Bemessungskurzzeitstromfestigkeit		(1 Sek. Strom)	A	2000		
Max. Anschlussquerschnitt - Nur Kupferleiter verwenden						
ein- bzw. mehrdrähtig			mm ²	50		
feindrähtig			mm ²	35		
feindrähtig mit Ademendhülsen nach DIN 46228			mm ²	35		

¹ Gültig für Netze mit geerdetem Sternpunkt, Überspannungskategorie III, Verschmutzungsgrad 3. Werte für andere Netzformen auf Anfrage.

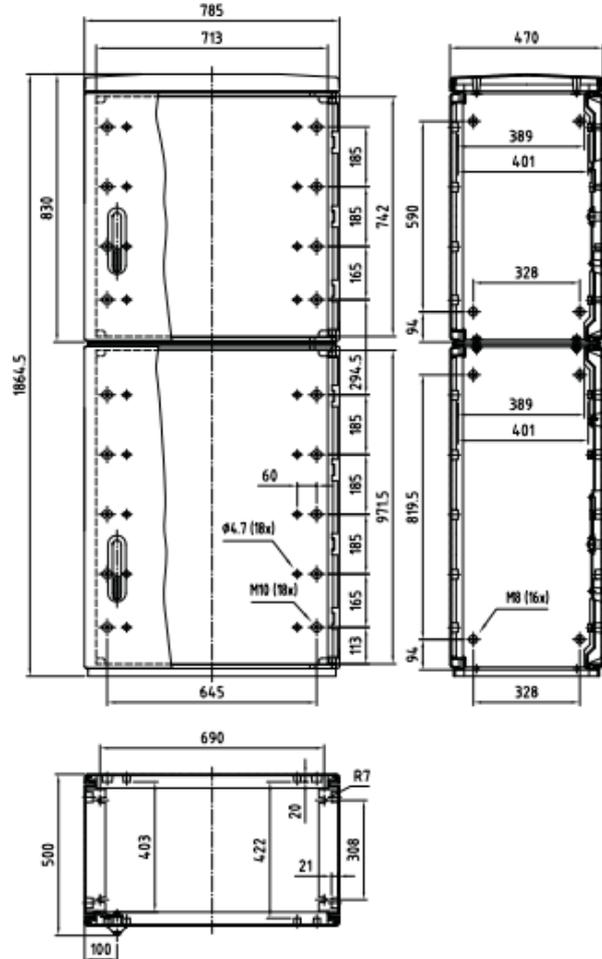
Sonstiges

Anzugsdrehmoment Klemmschraube:	3 Nm (27 lb-in)
Minimale Spannung:	auf Anfrage
Verlustleistung pro Pol bei I_u:	3,8 W
Vibrationsfestigkeit:	min. 4 g, 2-100 Hz, 1,6 mm
Schockfestigkeit:	min. 6 g, 6 ms
Min. Umgebungstemperatur der Kontakteinheit:	-5 °C
Max. Umgebungstemperatur der Kontakteinheit:	offen bei 100 % I_{u}/I_{th} 50 °C über 24 Stunden mit Spitzen bis 55 °C gekapselt bei 100 % I_{the} 35 °C über 24 Stunden mit Spitzen bis 40 °C
Lagertemperatur:	-40 °C bis 85 °C (Bei Temperaturen unter -5 °C keine Stoßbelastung zulässig)

Approbationen und Standards	IEC 60947 EN 60947				
------------------------------------	-----------------------	--	--	--	--

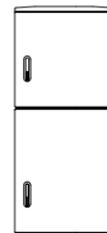
7.1.5 Verteiler DH F5 1080-850/470 (Fabrikat ELSTA Mosdorfer) [44]

Tiefe 470, Serie F, glatt DH F5 1080-850/470



1080-850
785x1850
BxH

DIN 1 und ÖNORM F5
Leerschrank zum Ausbau nach IEC 61439
Scharniertüren mit Einfachschwenkebel
für EHZ, ohne Ausstattung (leer).



F 7032 glatt

Polyesterchäpe freistehend

Tiefe	Serie	RAL-Farbe		Front		Varianten Türteilungen	Außenmaße BxHxT	P _{max} ΔT=20K	Type	Best.Nr.	
		7035	7032	glatt	ripp					IP 44	IP 54
320	F	•	•			o	785x1850x322	206 W	DH F5 1080-850/320	2439	2439.54
470	F	•	•			o	785x1865x470	255 W	DH F5 1080-850/470	2609	2609.54
635	F	•	•			o	785x1865x635	306 W	DH F5 1080-850/635	2731	2731.54

Die Verlustleistung P_{max} ist als Richtwert zu sehen. Im unteren Schrank dürfen max. 40% der Gesamtverlustleistung eingebracht werden.



7.1.6 Sicherheits-Einbaustecker ID/S6AR-N-B4S und Sicherheitsbuchse SLB-F6,3 (Fabrikat Stäubli) [32]

Technische Daten



Technical data



Caractéristiques techniques



Allgemeine Daten General data Données générales				Mechanische Daten Mechanical data Caractéristiques mécaniques							
Seite Page Page	Typ Type Type	Bestell Nr. Order No. No. de Cote	Farben ¹⁾ Couleurs ²⁾ Couleurs ³⁾	Anschluss Connection Raccordement	Letterquerschnitt Cu	Nenn-Ø Stift / Buchse	Auszugskraft Withdrawal force Force d'extraction	Steckkraft Insertion force Force d'embrochage	Max. Anzugsdrehmom. Max. tightening torque Couple maxi	Gewicht Weight Poids	Lamellentyp Multilam type Type de lamelle
					mm ²	Ø mm					
10	ID/B6AR-N-S	14.0010-*	20 – 29	Sa	–	6	25	30	3	0,044	LAIII
12	ID/B6AR-N/10-S	14.0013-*	20 – 29	P	10	6	25	30	3	0,035	LAIII
12	ID/B6AR-N/16-S	14.0014-*	20 – 29	P	16	6	25	30	3	0,034	LAIII
12	ID/B6AR-N/25-S	14.0017-*	20 – 29	P	25	6	25	30	3	0,036	LAIII
14	ID/S6AR-N-S	14.0004-*	20 – 29	Sa	25	6	–	–	–	0,035	–
14	ID/S6AR-N-B4S	14.0004-*	20 – 29	Sa	25	6 (4)	–	–	–	0,035	–
16	ID/S6NB	14.0006-*	20 – 29	Sa	25	6	–	–	–	0,032	–
17	ID/B6S	14.0000-*	20 – 29	Sa	–	6	–	–	–	0,045	–
18	AB6AR-S/9,4	14.0023-*	20 – 29	Sa	10	6	25	30	3	0,047	LAIII
18	AB6AR-S/12,4	14.0029-*	20 – 29	Sa	10	6	25	30	3	0,047	LAIII
20	AS6AR-S/9,4	14.0030-*	20 – 29	Sa	10	6 (4)	25	30	3	0,034	–
20	AS6AR-S/12,4	14.0033-*	20 – 29	Sa	10	6 (4)	25	30	3	0,034	–
22	IB6AR-N-S	14.2016-*	21 – 29	Sa	–	6	25	30	–	0,027	LAIII
23	BD6AR-N-S	14.1006	–	St	–	6	25	30	–	0,032	LAIII
23	VS6-50	14.1002	–	St	–	6	–	–	–	0,036	–
24	AZB6AR-N-S/6-4	14.1013	–	St	–	6/4	25	30	–	0,039	LAIII
25	AZS6AR-N/6-4	14.1012	–	St	–	6 (4)	25	30	–	0,054	LAIII
25	RS6AR/4S	14.1000	–	St	–	6/4	–	–	–	0,010	–
26	KBT6AR-N/10-S	15.0017-*	21 – 29	P	10	6	25	30	–	0,031	LAIII
26	KBT6AR-N/16-S	15.0020-*	21 – 29	P	16	6	25	30	–	0,031	LAIII
27	KBT6AR-N/25-S-L	15.0140-21	–	P	25	6	25	30	–	–	LAIII
28	KST6AR-N/10	15.0001-*	21 – 29	P	10	6	–	–	–	0,015	–
28	KST6AR-N/16	15.0002-*	21 – 29	P	16	6	–	–	–	0,016	–
29	KST6AR-N/25-L	15.0142-21	–	P	25	6	–	–	–	–	–
31	KST6N/10	15.0007-*	21 – 29	P	10	6	–	–	–	0,014	–
31	KST6/10F	15.0018-*	21 – 29	P	10	6	15	–	–	0,014	LAIII
31	KST6N/16	15.0008-*	21 – 29	P	16	6	–	–	–	0,015	–
31	KST6/16F	15.0019-*	21 – 29	P	16	6	15	–	–	0,015	LAIII
32	KBT6AR-W-N/10-S	15.0078-*	21 – 29	P	10	6	–	–	–	0,055	–
32	KBT6AR-W-N/16-S	15.0084-*	21 – 29	P	16	6	–	–	–	0,056	–
33	KBT6AR-W-N/25-S-L	15.0141-21	–	P	25	6	25	30	–	–	LAIII
34	KST6AR-W-N/10	15.0064-*	21 – 29	P	10	6	–	–	–	0,043	–
34	KST6AR-W-N/16	15.0074-*	21 – 29	P	16	6	–	–	–	0,044	–
35	KST6AR-W-N/25-L	15.0143-21	–	P	25	6	–	–	–	–	–

* = Farbcode

¹⁾ Farbcode siehe Seite 6

Sa = Schraubanschluss

P = Crimpanschluss

St = Steckanschluss

* = Colour code

¹⁾ Colour code see page 6

Sa = Screw terminal

P = Crimp connection

St = Plug-in connection

* = Code couleurs

²⁾ Code couleurs voir page 6

Sa = Raccordement à visser

P = Fût à sertir

St = Raccordement à enficher



Allgemeine Daten General data Données générales				Elektrische Daten Electrical data Caractéristiques électriques					
Seite Page Page	Typ Type Type	Bestell Nr. Order No. No. de Code	Farben ¹⁾ Couleurs ¹⁾ Couleurs ¹⁾	Bemessungsstrom Rated current Intensité assignée	Bemessungsspannung ²⁾ Rated voltage ²⁾ Tension assignée ²⁾	Kontaktwiderstand Contact resistance Résistance de contact	Kurzschlussstrom 1s Short-circuit current 1s Intensité de court-circuit 1s	Kurzschlussstrom 3s Short-circuit current 3s Intensité de court-circuit 3s	Stossstrom Surge current Intensité crête
				A	V	μΩ	kA	kA	kA
10	ID/B6AR-N-S	14.0010-*	20 – 29	100	600	160	1,2	0,7	8,0
12	ID/B6AR-N/10-S	14.0013-*	20 – 29	80	600	160	1,2	0,7	8,0
12	ID/B6AR-N/16-S	14.0014-*	20 – 29	100	600	160	2,0	1,2	8,0
12	ID/B6AR-N/25-S	14.0017-*	20 – 29	125	600	160	2,5	1,5	8,0
14	ID/S6AR-N-S	14.0004-*	20 – 29	125	600	–	1,2	0,7	8,0
14	ID/S6AR-N-S4S	14.0034-*	20 – 29	80	600	–	1,2	0,7	8,0
16	ID/S6NB	14.0006-*	20 – 29	125	600	–	1,2	0,7	8,0
17	ID/B6S	14.0000-*	20 – 29	80	600 ³⁾	160	1,2	0,7	8,0
18	AB6AR-S/9,4	14.0023-*	20 – 29	80	600	160	1,2	0,7	8,0
18	AB6AR-S/12,4	14.0029-*	20 – 29	80	600	160	1,2	0,7	8,0
20	AS6AR-S/9,4	14.0030-*	20 – 29	80	600	–	1,2	0,7	8,0
20	AS6AR-S/12,4	14.0033-*	20 – 29	80	600	–	1,2	0,7	8,0
22	IB6AR-N-S	14.2016-*	20 – 29	80	600 ³⁾	160	1,2	0,7	8,0
23	BD6AR-N-S	14.1006		80	600	160	–	–	–
23	VS6-50	14.1002		80	500 ³⁾	–	–	–	–
24	AZB6AR-N-S/6-4	14.1013		80	600 ³⁾	160	1,2	0,7	8,0
25	AZS6AR-N/6-4	14.1012		80	600 ³⁾	160	1,2	0,7	8,0
25	RS6AR/4S	14.1000	22	32	600 ³⁾	–	–	–	–
26	KBT6AR-N/10-S	15.0017-*	21 – 29	80	600	160	1,2	0,7	8,0
26	KBT6AR-N/16-S	15.0020-*	21 – 29	100	600	160	2,0	1,2	8,0
27	KBT6AR-N/25-S-L	15.0140-21		125	600	160	2,5	1,5	8,0
28	KST6AR-N/10	15.0001-*	21 – 29	80	600 ³⁾	–	1,2	0,7	8,0
28	KST6AR-N/16	15.0002-*	21 – 29	100	600 ³⁾	–	2,0	1,2	8,0
29	KST6AR-N/25-L	15.0142-21		125	600 ³⁾	–	2,5	1,5	8,0
31	KST6N/10	15.0007-*	21 – 29	80	600 ³⁾	–	1,2	0,7	8,0
31	KST6/10F	15.0018-*	21 – 29	80	600 ³⁾	160	1,2	0,8	8,0
31	KST6N/16	15.0008-*	21 – 29	100	600 ³⁾	–	2,0	1,2	8,0
31	KST6/16F	15.0019-*	21 – 29	100	600 ³⁾	160	2,0	1,2	8,0
32	KBT6AR-W-N/10-S	15.0078-*	21 – 29	80	600	160	1,2	0,7	8,0
32	KBT6AR-W-N/16-S	15.0084-*	21 – 29	100	600	160	2,0	1,2	8,0
33	KBT6AR-W-N/25-S-L	15.0141-21		125	600	160	2,5	1,5	8,0
34	KST6AR-W-N/10	15.0064-*	21 – 29	80	600 ³⁾	–	1,2	0,7	8,0
34	KST6AR-W-N/16	15.0074-*	21 – 29	100	600 ³⁾	–	2,0	1,2	8,0
35	KST6AR-W-N/25-L	15.0143-21		125	600 ³⁾	–	2,5	1,5	8,0

* = Farbcode

¹⁾ Farbcode siehe Seite 6

²⁾ Nur in gestecktem Zustand

³⁾ Während der Installation und/oder dem Stecken und Trennen muss der Anschluss spannungsfrei sein! Der Schutz gegen elektrischen Schlag muss durch das Endprodukt gegeben sein.

* = Colour code

¹⁾ Colour code see page 6

²⁾ In the mated condition only!

³⁾ During installation, connecting or disconnecting, the terminal must not be connected to the supply! Protection against electric shock has to be provided in the finished product.

* = Code couleurs

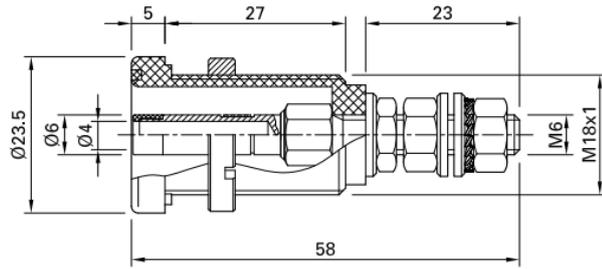
¹⁾ Code couleurs voir page 6

²⁾ Seulement à l'état connecté!

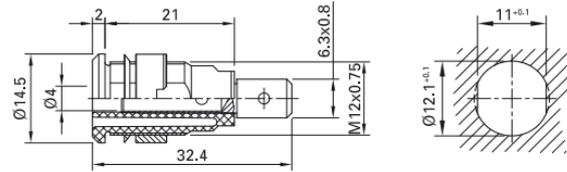
³⁾ Pendant l'installation et les phases d'embrochage ou débrochage, l'élément à raccorder ne doit pas être sous tension. La protection contre les chocs électriques doit être assurée par le produit fini, à l'état monté.



ID/S6AR-N-B4S



SLB4-F6,3

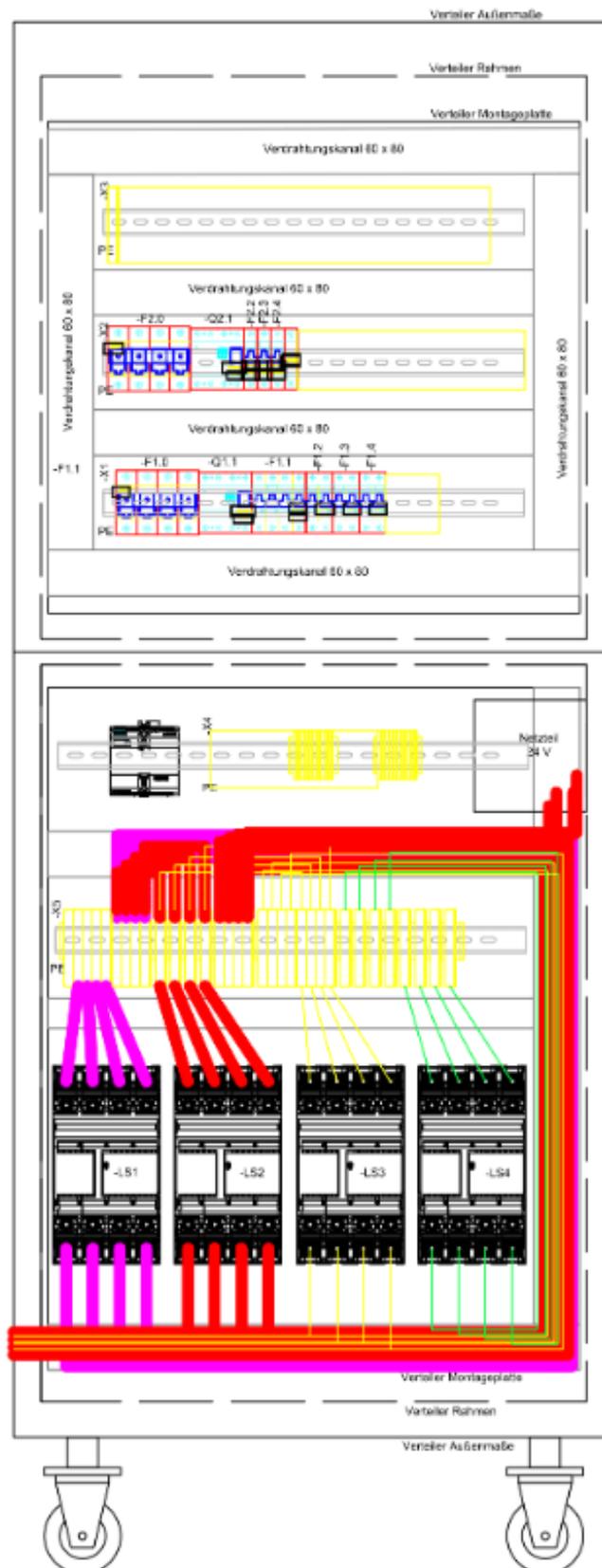


Bestell-Nr.	Typ	Bemessungsspannung/-strom	Anschluss		*Standardfarben
23.3000-*	SLB4-F	1000 V, CAT III / 24 A 600 V, CAT IV / 24 A	Flachstecker 4,8 mm × 0,8 mm	Au c RL us	20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
49.7044-*	SLB4-F/N-X	1000 V, CAT III / 24 A 600 V, CAT IV / 24 A	Flachstecker 4,8 mm × 0,8 mm	Ni c RL us	20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
23.3060-*	SLB4-F6,3	1000 V, CAT III / 32 A 600 V, CAT IV / 32 A	Flachstecker 6,3 mm × 0,8 mm	Au c RL us	20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
49.7046-*	SLB4-F6,3/N-X	1000 V, CAT III / 32 A 600 V, CAT IV / 32 A	Flachstecker 6,3 mm × 0,8 mm	Ni c RL us	20 21 22 23 24 25 26 27 28 29

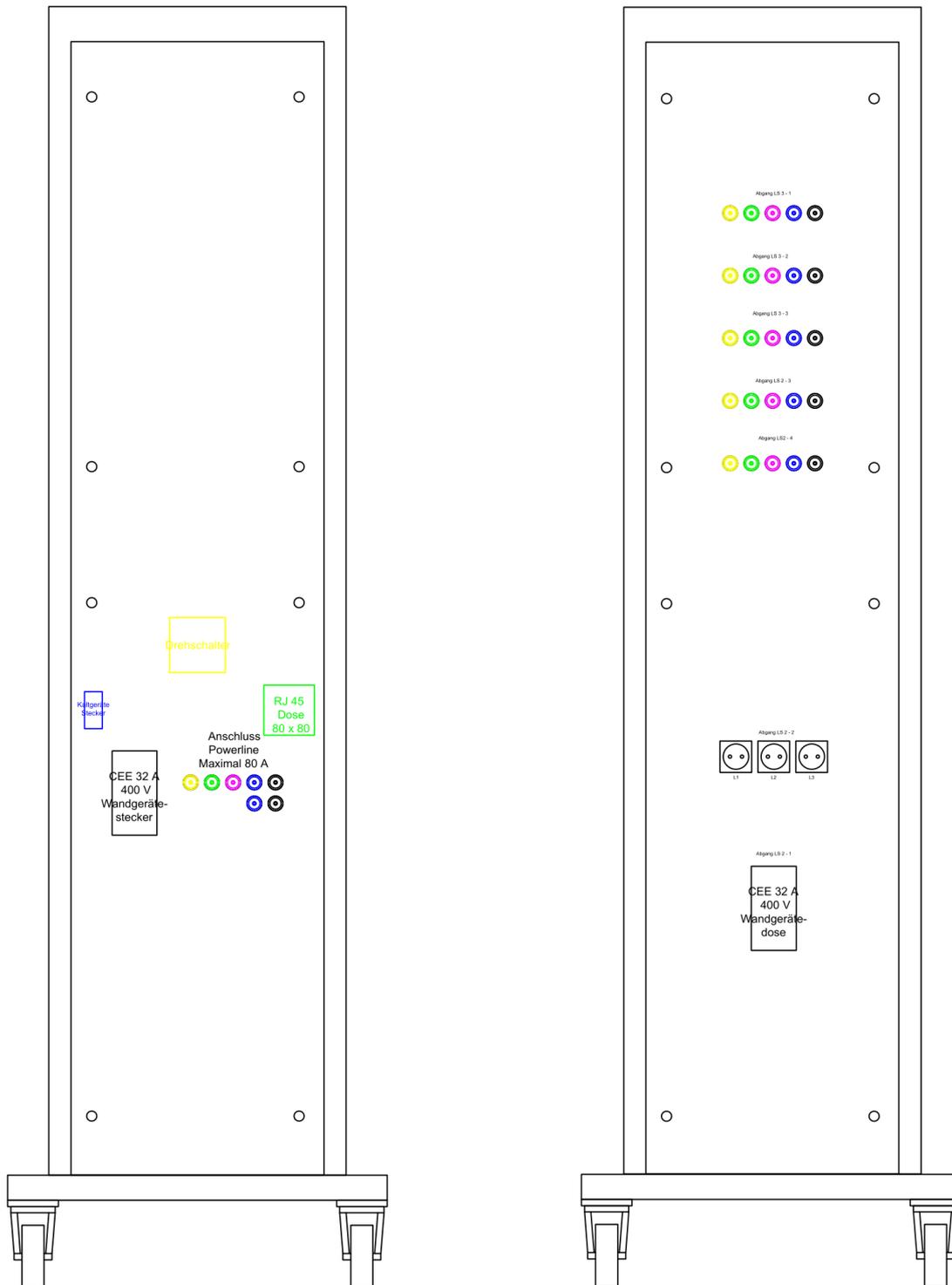


7.2 AutoCAD Plan (*.dwg)

7.2.1 Projektierte Frontansicht des Verteilers mit Teilverkabelung

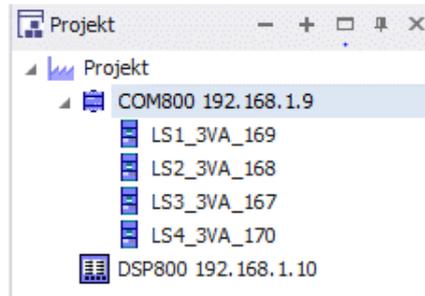


7.2.2 Projektierte seitliche Ansichten des Labordemonstrators

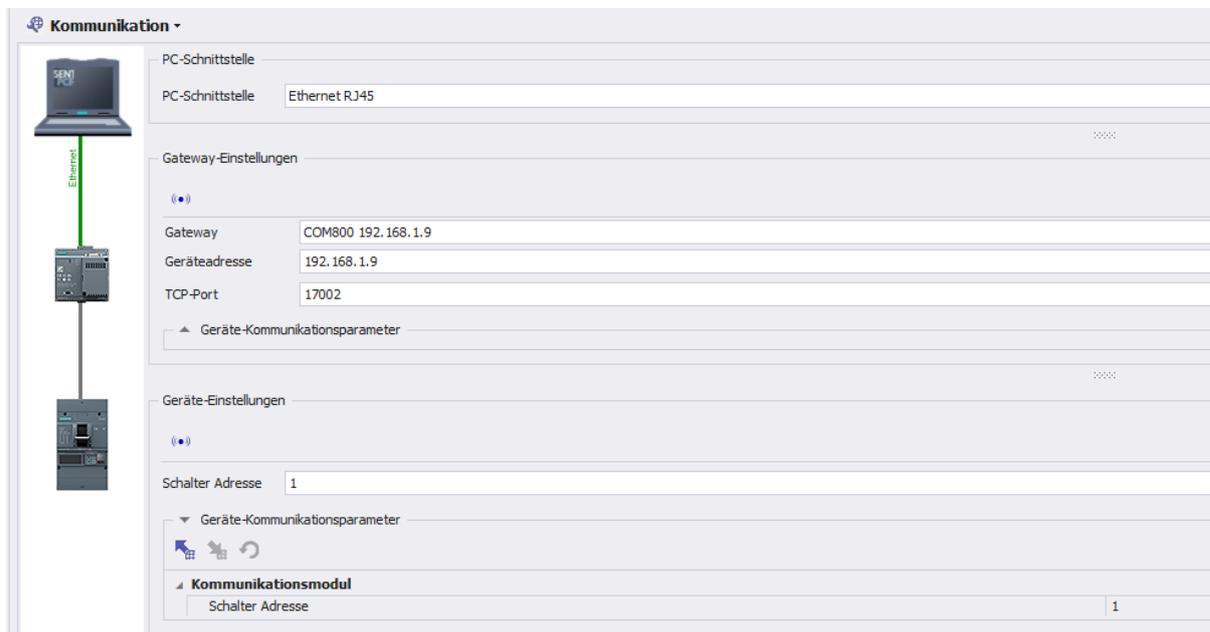


7.3 Siemens powerconfig Software

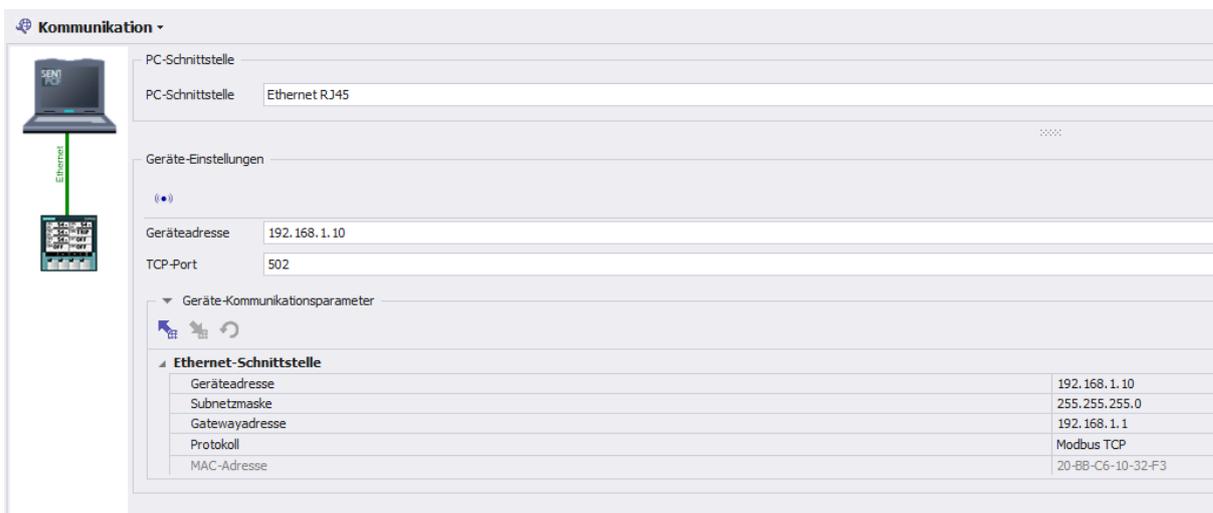
Eingefügte Komponenten



Adressen eines LS und des Kommunikationsmoduls



Adressen des Displays





7.4 Messwerte

7.4.1 Strom und Spannungsmessung

Last Symmetrisch Stufe 1 4,4 A 54 Ω

	Dewetron						LS						Multimeter			Fluke Stromzange						
	I1	I2	I3	In	U1	U2	U3	I1	I2	I3	In	U1	U2	U3	U1	U2	U3	I1	I2	I3	In	
Stromaufteilung	A	A	A	mA	V	V	V	A	A	A	A	V	V	V	V	V	V	A	A	A	A	
LS1 Eingang	4.1	4.2	4.2	168	228.8	232	230	x	x	x	x	x	x	x	228.3	232.5	230.28	4.13	4.28	4.27	0.19	
LS1 Ausgang	4.1	4.2	4.2	176.7	227.1	230.2	228.6	4.1	4.3	4.3	0	228	232	230	226.8	231.4	229.6				4.31	0.19
LS3 Eingang	4.1	4.2	4.2	183	228.6	231.8	230.2	x	x	x	x	x	x	x	227.93	231.86	229.91	4.14	4.28	4.28	0.19	
LS3 Ausgang	4.1	4.2	4.2	163.5	228.4	231.1	229.7	4.1	4.2	4.3	0	229	232	230	227.49	231.01	229.91				4.24	0.19

Last Symmetrisch Stufe 2 8,9 A 27 Ω

	Dewetron						LS						Multimeter			Fluke Stromzange						
	I1	I2	I3	In	U1	U2	U3	I1	I2	I3	In	U1	U2	U3	U1	U2	U3	I1	I2	I3	In	
Stromaufteilung	A	A	A	A	V	V	V	A	A	A	A	V	V	V	V	V	V	A	A	A	A	
LS1 Eingang	8.3	8.3	8.3	155.8	228.9	231.2	229.5	x	x	x	x	x	x	x				8.22	8.36	8.3	0.19	
LS1 Ausgang	8.1	8.3	8.3	316	225	229.9	227.8	8.2	8.3	8.3	0	227	229	227	226.9	228.8	227.1					
LS3 Eingang	8.2	8.3	8.3	184	228.4	230.6	228.6	x	x	x	x	x	x	x				8.3	8.33	8.33	0.21	
LS3 Ausgang	8.3	8.3	8.3	209	227.6	230.1	228.7	8.1	8.3	8.3	0	225	230	228								

Last Symmetrisch Stufe 3 13,3 A 18 Ω

	Dewetron						LS						Multimeter			Fluke Stromzange						
	I1	I2	I3	In	U1	U2	U3	I1	I2	I3	In	U1	U2	U3	U1	U2	U3	I1	I2	I3	In	
Stromaufteilung	A	A	A	A	V	V	V	A	A	A	A	V	V	V	V	V	V	A	A	A	A	
LS1 Eingang	12.3	12.3	12.1	280	225.2	227.4	225.8	x	x	x	x	x	x	x	226.4	228.1	226.4	12.51	12.67	12.55	0.27	
LS1 Ausgang	12.2	12.4	12.2	454	223.3	228.7	226.9	12.3	12.4	12.3	0	226	228	226	225.8	227.9	225.8					
LS3 Eingang	12.3	12.4	12.3	275	227	228.9	227.6	x	x	x	x	x	x	x				12.32	12.4		12.35	0.27
LS3 Ausgang	12.2	12.3	12.2	292.1	225	227.4	226.3	12.2	12.4	12.3	0	224	229	227								

Last Symmetrisch Stufe 4 17,8 A 13,5 Ω

	Dewetron						LS						Multimeter			Fluke Stromzange						
	I1	I2	I3	In	U1	U2	U3	I1	I2	I3	In	U1	U2	U3	U1	U2	U3	I1	I2	I3	In	
Stromaufteilung	A	A	A	A	V	V	V	A	A	A	A	V	V	V	V	V	V	A	A	A	A	
LS1 Eingang	16.4	16.4	16.2	335	225.3	227.7	226	x	x	x	x	x	x	x				16.74	16.97	16.66	0.35	
LS1 Ausgang	16.3	16.4	16.2	535	223.2	226.9	225.2	16.3	16.5	16.2	0	223	227	225	225.6	228.1	226.4					
LS3 Eingang	16.5	16.5	16.3	360.8	225.7	227.7	226.3	x	x	x	x	x	x	x				16.64	16.66	16.4	0.31	
LS3 Ausgang	16.3	16.3	16.2	338.5	223.6	226	224.7	16.3	16.5	16.2	0	223	227	225								

Last Symmetrisch Stufe 5 22,2 A 10,8 Ω

	Dewetron						LS						Multimeter			Fluke Stromzange						
	I1	I2	I3	In	U1	U2	U3	I1	I2	I3	In	U1	U2	U3	U1	U2	U3	I1	I2	I3	In	
Stromaufteilung	A	A	A	A	V	V	V	A	A	A	A	V	V	V	V	V	V	A	A	A	A	
LS1 Eingang	20.5	20.6	20.3	500	224.3	226.6	225.3	x	x	x	x	x	x	x				20.72	20.95	20.56	0.56	
LS1 Ausgang	20.3	20.6	20.1	545	224	225.3	222.6	20.3	20.6	20.1	0	223	225	224	223.1	226.6	224.9					
LS3 Eingang	20.6	20.7	20.3	551	224.9	226.8	225.5	x	x	x	x	x	x	x				20.68	20.77	20.63	0.5	
LS3 Ausgang	20.3	20.4	20.2	530	221.7	223.2	222.7	20.3	20.6	20	0	223	225	223								

7.4.2 Niederohm-messung

		Abgang	Widerstand			
			RL1	RL2	RL3	RN
Tür	LS2-1	0.01	0.03	0	0	0.05
	LS2-2	0.02	0.04	0	0	0.09
	LS2-3	0	0.02	0	0	0.02
	LS2-4	0	0	0	0	0.04
	LS3-1	0	0	0	0	0.05
	LS3-2	0	0	0	0	0.02
Seitlich	LS3-3	0	0	0	0	0.02
	LS2-1	0	0	0	0	0
	LS2-2	0	0	0	0	0
	LS2-3	0	0	0.05	0	0
	LS2-4	0	0	0.04	0	0
	LS3-1	0	0	0.02	0	0.01
LS3-2	0	0	0.02	0	0	
LS3-3	0	0	0.03	0	0	



7.4.3 Unsymmetrische Stromaufteilung

Powerconfig
Abgang LS 3-1

Stromaufteilung	Stufe 2	8,9 A	27 Ω
LS1	8,2	8,3	8,3
LS2	2,2	1,7	3,2
LS3	6	6,6	5,1
LS4	2,2	1,7	3,2

Last Symmetrisch
Stufe 3 13,3 A 18 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	12,2	12,3	12,2
LS2	3,3	2,6	4,7
LS3	8,9	9,7	7,5
LS4	3,3	2,6	4,7

Last Symmetrisch
Stufe 4 17,8 A 13,5 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	16,3	16,4	16,2
LS2	4,4	3,5	6,2
LS3	11,8	12,9	9,9
LS4	4,4	3,4	6,2

Last Symmetrisch
Stufe 5 22,2 A 10,8 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	20,1	20,4	20
LS2	5,5	4,4	7,7
LS3	14,6	16	12,3
LS4	5,5	4,4	7,7

Powerconfig
Abgang LS 3-2

Stromaufteilung	Stufe 2	8,9 A	27 Ω
LS1	8,3	8,4	8,4
LS2	2,3	1,7	3,5
LS3	5,9	6,6	4,8
LS4	2,3	1,8	3,5

Last Symmetrisch
Stufe 3 13,3 A 18 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	12,3	12,5	12,3
LS2	3,5	2,7	5,2
LS3	8,8	9,8	7,1
LS4	3,5	2,7	5,2

Last Symmetrisch
Stufe 4 17,8 A 13,5 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	16,5	16,5	16,3
LS2	4,7	3,6	6,8
LS3	11,7	12,9	9,4
LS4	4,7	3,7	6,8

Last Symmetrisch
Stufe 5 22,2 A 10,8 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	20,4	20,7	20,2
LS2	5,9	4,6	8,5
LS3	14,5	16	11,8
LS4	5,9	4,5	8,5

Powerconfig
Abgang LS 3-3

Stromaufteilung	Stufe 2	8,9 A	27 Ω
LS1	8,3	8,3	8,3
LS2	3,3	2,8	4,3
LS3	4,9	5,6	4
LS4	3,3	2,7	4,3

Last Symmetrisch
Stufe 3 13,3 A 18 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	12,3	12,4	12,3
LS2	5	4,2	6,4
LS3	7,3	8,2	5,9
LS4	5	4,2	6,3

Last Symmetrisch
Stufe 4 17,8 A 13,5 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	16,4	16,5	16,2
LS2	6,6	5,6	8,4
LS3	9,8	10,9	7,8
LS4	6,6	5,5	8,4

Last Symmetrisch
Stufe 5 22,2 A 10,8 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	20,5	20,7	20,3
LS2	8,2	6,8	10,6
LS3	12,1	13,8	9,6
LS4	8,2	6,9	10,5

Powerconfig
Abgang LS 2-4

Stromaufteilung	Stufe 2	8,9 A	27 Ω
LS1	8,3	8,4	8,4
LS2	5	4,3	5,8
LS3	3,3	4	2,5
LS4	3,2	3,9	2,4

Last Symmetrisch
Stufe 3 13,3 A 18 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	12,3	12,4	12,5
LS2	7,4	6,5	8,6
LS3	4,9	5,9	3,7
LS4	4,9	5,9	3,6

Last Symmetrisch
Stufe 4 17,8 A 13,5 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	16,4	16,5	16,2
LS2	9,8	8,8	11,3
LS3	6,6	7,7	4,9
LS4	6,5	7,6	4,8

Last Symmetrisch
Stufe 5 22,2 A 10,8 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	20,4	20,7	20,3
LS2	12,3	11,4	14,2
LS3	8,1	9,4	6,1
LS4	8,1	9,4	6

Powerconfig
Abgang LS 2-3

Stromaufteilung	Stufe 2	8,9 A	27 Ω
LS1	8,3	8,4	8,3
LS2	6,3	6,8	6,7
LS3	1,9	1,5	1,6
LS4	1,9	1,4	1,5

Last Symmetrisch
Stufe 3 13,3 A 18 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	12,3	12,4	12,3
LS2	9,3	10,1	9,8
LS3	2,9	2,3	2,4
LS4	2,9	2,3	2,3

Last Symmetrisch
Stufe 4 17,8 A 13,5 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	16,4	16,5	16,2
LS2	12,5	13,4	13
LS3	3,9	3,1	3,2
LS4	3,9	3	3,2

Last Symmetrisch
Stufe 5 22,2 A 10,8 Ω

Stromaufteilung	I1	I2	I3
LS1	20,5	20,7	20,3
LS2	15,5	16,9	16,3
LS3	4,9	3,8	4
LS4	4,9	3,8	4