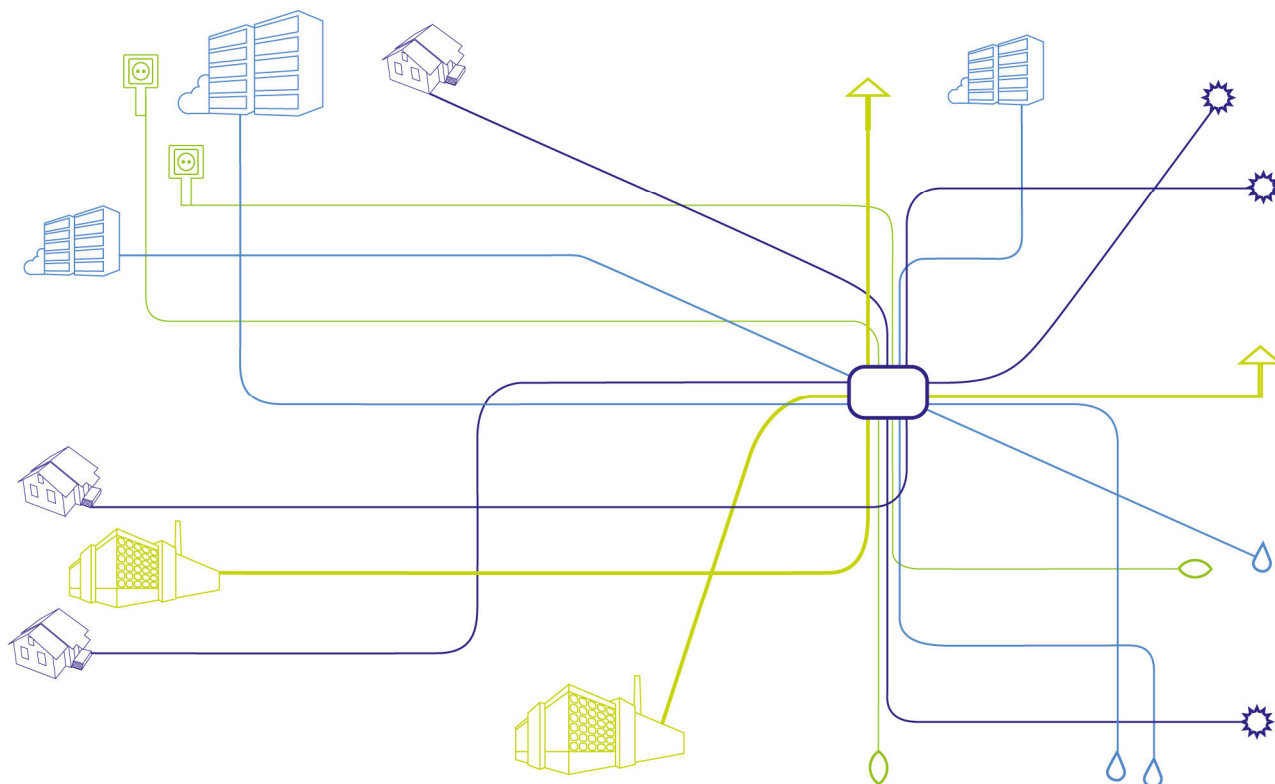




Smart Safety

Personensicherheit als unabdingbare Voraussetzung für Smart Systems und verteilte Energiesysteme



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	4
2	Abstract	5
3	Einleitung.....	6
3.1	Aufgabenstellung	6
3.2	Schwerpunkte des Projektes	7
3.3	Einordnung in das Programm „ Neue Energien 2020“	7
3.4	Verwendete Methoden	8
3.5	Aufbau der Arbeit	9
4	Inhaltliche Darstellung	10
4.1	Literaturrecherche und Recherche vorhandener Lösungsmöglichkeiten.....	10
4.2	Anpassung der Lösungsmöglichkeiten an Smart Systems und verteilte Energiesysteme sowie Bestimmung neuer Lösungen.....	12
4.3	Filterung der Lösungsmöglichkeiten nach Effektivität und Umsetzbarkeit.....	13
4.4	Entwicklung eines Berechnungstools	14
4.5	Netz- und Labormessungen	17
5	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	22
6	Ausblick und Empfehlungen	23
7	Literaturverzeichnis.....	24

Neue Energien 2020 - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – managed by Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft



1 Kurzfassung

Durch einen zu erwartenden erhöhten Anteil der Energiebereitstellung aus kleinen bis mittleren dezentralen Erzeugungseinheiten kann bei Ausfall der übergeordneten Energieversorgung eine Netzinsel (Inselnetz mit einem Erzeuger bzw. mit mehreren verteilten Erzeugern) grundsätzlich weiter versorgt werden.

Untersuchungsergebnisse im Labor sowie in einer realen, typischen Hausinstallation zeigen, dass sowohl die notwendige Kurzschlussleistung zur Auslösung der Schutzeinrichtungen (bisher Sicherungen oder Leitungsschutzschalter, in Zukunft u.U. geeignete elektronische Schutzeinrichtungen), als auch die Sternpunktbehandlung von Generatoren kleiner bis mittlerer Leistung sowie auch der Personen- und Sachgüterschutz in Netzen, die von kurzschlussstromschwachen Erzeugern versorgt werden (z.B. Wechselrichter), von besonderer Wichtigkeit sind.

Hinsichtlich der Gewährleistung der Sicherheit von Personen und Sachgütern sowie der Selektivität, als Voraussetzung für den sicheren und zuverlässigen Betrieb von elektrischen Netzen mit vermehrt dezentraler Einspeisung, konnte im Inselnetzbetrieb nachgewiesen werden, dass eine ordnungsgemäße Zeit-Staffelung des zur Absicherung des Wechselrichters vorgesehenen Leitungsschutzschalters mit den in der Hausinstallation derzeit üblichen und untersuchten Schutzeinrichtungen nicht möglich ist.

Durch die Nachbildung von Betriebs- und Fehlerszenarien in kontrollierter Versuchsumgebung sowie in einem realen Netz konnte die Funktionalität bestehender Schutzkonzepte in einer elektrischen Anlage einerseits im konventionellen Netzbetrieb und andererseits bei Versorgung der Anlage über eine kurzschlussstromschwache dezentrale Erzeugungseinheit beschrieben werden. Mit den Erkenntnissen aus den Untersuchungen ist es möglich, das beschriebene Konzept zur Nachbildung verschiedener Niederspannungssysteme (TN, IT, TT etc.) für schutztechnische Betrachtungen und Untersuchungen hinsichtlich der derzeit möglichen Gefährdung von Personen und Sachgütern weiterzuverfolgen, sicherheitskritische Aspekte nachzuweisen, die gewonnenen Erkenntnisse in ein Berechnungstool zu implementieren und damit die Funktionalität von in Niederspannungsnetzen eingesetzten Schutzsystemen bei vermehrter dezentraler Erzeugung voranzutreiben.

2 Abstract

Due to the increase of renewable energies from decentralized small and medium power generation units the autonomous power supply for a grid in case of a power outage in the distribution grid is possible.

Examination results both in the laboratory and in a real, typical house installation show, that on one hand the short circuit current to trip protection devices e.g. classical fuses and in future electronically protection devices is important. On the other hand the neutral point treatment of generators of small and medium power is also relevant in order to guarantee the personal safety and protection of real assets which are supplied by generators with a limited short circuit capacity e.g. inverters

In terms of personal safety and security of real assets as well as the selectivity requirements increase for a secure and reliable grid operation. Examinations in an islanded grid show, that a proper time grading of circuit breakers for the protection of a typical domestic house installation is currently not given.

Through the simulation of grid operation scenarios and fault scenarios in a controlled laboratory environment and in a real grid the functionality of existing protection concepts for the parallel grid operation and the islanded grid operation are described.

With the current technical expertise the presented concept for the simulation of different types of low-voltage grids (TN, IT, TT ...) for protection analysis requires further investigations to find solutions for an increased decentralized generation.

3 Einleitung

Die von der Europäischen Union geforderte Zielsetzung bis 2020 den Gesamtanteil erneuerbarer Energien um 20 % zu steigern, erfordert neben vielen neuen Maßnahmen auch eine Um- bzw. Neustrukturierung in der Verteilnetzebene. Kleine und mittlere Erzeugungseinheiten sollen dezentral in das Niederspannungsnetz eingebunden werden. Durch die zu erwartende Entwicklung weg von den passiven Niederspannungsnetzen, mit einem dominanten Lastfluss von großen Erzeugern direkt zu den Verbrauchern, hin zu einem aktiven Netz mit vielen auch kleinen Erzeugern, in dem der Lastfluss auch umgekehrt werden kann oder nur von Zeit zu Zeit ein geringer Energiefluss vom übergeordneten Netz auftritt, treten vermehrt neue Fragestellungen hinsichtlich der Funktionalität des Netz- und Personenschutzes, der Selektivität, der Netzregelung sowie der Netzautomatisierung im Netzparallel- und im Inselnetzbetrieb auf.

Durch die Entwicklung von Smart-Grid-Technologien (insbesondere der Informations- und Kommunikationstechnologie, IKT) soll neben dem bereits üblichen Netzparallelbetrieb auch die Bildung von Netzzinseln, sog. Microgrids und somit eine autarke Versorgung mit elektrischer Energie möglich werden. Dabei müssen jedoch Aspekte der Personen- und Anlagensicherheit, insbesondere bei Einspeisung über nicht rotierende dezentrale Stromquellen mit geringer Kurzschlussleistung berücksichtigt werden. Die Bereitstellung der benötigten Kurzschlussleistung im Zusammenhang mit der fluktuierenden Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen wie Photovoltaik und Wind bedarf noch detaillierterer Untersuchungen. Die in der Mittel- bzw. der Niederspannung bestehenden Schutzkonzepte müssen überdacht und hinsichtlich der Gewährleistung der Personen- und Anlagensicherheit überprüft werden.

3.1 Aufgabenstellung

Durch die Bestrebung, zukünftig den Ausbau erneuerbarer Energieträger zu forcieren und damit den Anteil erneuerbarer Energieträger in Österreich auf 34 % zu erhöhen [31], ergeben sich neue Fragestellungen u.a. hinsichtlich der an der Netzregelung beteiligten Partner, dem möglichen Auftreten bidirektionaler Lastflüsse bzw. Kurzschlussstromflüsse sowie – durch die beschränkt vorhandene bzw. zu geringe Kurzschlussleistung – Einspeiser kleiner bis mittlerer Größe in der Verteilnetzebene.

Die Gewährleistung der Sicherheit von Personen und Sachgütern sowie die Einhaltung der Selektivität der Schutzeinrichtungen ist im Niederspannungsnetz eine Voraussetzung für den sicheren und zuverlässigen Betrieb von elektrischen Netzen mit vermehrt dezentraler Einspeisung sowohl im Netzparallel- als auch im Inselnetzbetrieb. Variable bzw. völlig unabhängige (autarke) Energieversorgungsnetzbereiche erfordern Untersuchungen hinsichtlich der Funktionalität bisher eingesetzter Schutztechnologien.

Im Falle der Einspeisung in das elektrische Netz über Wechselrichter (mit z.B. Photovoltaik oder Wind als Quelle) im Inselnetzbetrieb ist daher zu prüfen, ob beim Betrieb eines öffentlichen Niederspannungsnetzes (insbesondere im Bereich der Hausinstallationen) der erforderliche Abschaltstrom für ein sicheres und selektives Abschalten der bestehenden Schutzelemente in der angemessenen Qualität (Größe und Dauer) bereitgestellt werden kann.

3.2 Schwerpunkte des Projektes

Durch die zu erwartende Entwicklung weg von den rein passiven Niederspannungsnetzen, mit einem dominanten Lastfluss von großen Erzeugern direkt zu den Verbrauchern, hin zu einem aktiven Netz mit vielen auch kleinen Einspeisern, in dem der Lastfluss sich auch umkehren kann oder nur von Zeit zu Zeit ein geringer Energiefluss vom übergeordneten Netz Auftreten, treten vermehrt neue Fragestellungen hinsichtlich der Funktionalität des Netz- und Personenschutzes, der Selektivität, der Netzregelung sowie der Netzautomatisierung im Netzparallel- und im Inselnetzbetrieb auf. Durch die Entwicklung von Smart-Grid-Technologien (insbesondere der Informations- und Kommunikationstechnologie, IKT) soll neben dem bereits üblichen Netzparallelbetrieb auch die Bildung von energieautonomen Netzeinseln, sog. Microgrids¹ und somit eine mögliche autarke Versorgung mit elektrischer Energie möglich werden.

3.3 Einordnung in das Programm „Neue Energien 2020“

Die vorliegende technische Durchführbarkeitsstudie liefert Erkenntnisse für die zukünftige Auslegung und Adaption von Schutzmaßnahmen in neuen Netzformen – Smart Systems bzw. Smart Grids. Durch die Möglichkeit bidirektionaler Lastflüsse und die im Vergleich zur klassischen Versorgung bei dezentralen Erzeugungsanlagen kleiner bis mittlerer Leistungsklasse resultierende geringere Kurzschlussleistung, ergeben sich bedeutsame Fragestellungen hinsichtlich der üblicherweise installierten Schutzsysteme.

Durch den vermehrten Einsatz von dezentralen Erzeugungsanlagen (geringere Kurzschlussleistung) müssen die bestehenden Schutzsysteme im Fehlerfall den Kurzschluss bzw. Erdschluss unter erschwerten Bedingungen erkennen und den fehlerbehafteten Abzweig vom Netz trennen.

¹ Ein „Microgrid“ ist ein abgeschlossenes, dezentral versorgtes Netzgebiet, das im Normalbetrieb mit dem öffentlichen Netz durch definierte Schnittstellen verbunden ist und unter besonderen Bedingungen unabhängig vom öffentlichen Verbundnetz betrieben werden kann [3].

3.4 Verwendete Methoden

Zu Beginn der Arbeit wurde eine Literaturrecherche auf dem Gebiet der Normen und der allgemein erhältlichen Publikationen durchgeführt, um einen Überblick über bestehende Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Smart Grids, im Speziellen der Schutz- und Sicherheitsthematik, zu erhalten.

Die durchgeführten Simulationen in MATLAB/Simulink® liefern grundlegende Erkenntnisse über das Verhalten von dezentralen Energieerzeugungseinheiten (Synchrongeneratoren) mit geringer Kurzschlussleistung.

Die messtechnische Ermittlung der charakteristischen Parameter der untersuchten Synchrongeneratoren (8,1 kVA bzw. 1 kVA), zeigen die Unterschiede zu den in zentralen Kraftwerken eingesetzten Synchrongeneratoren der MVA-Klasse auf. Desweiteren ist es möglich, mit den zuvor messtechnisch ermittelten Parametern der Synchrongeneratoren, die Ergebnisse mit einer dynamischen Simulation zu verifizieren.

Grundlegende Laboruntersuchungen mit nicht rotierenden Energiequellen (5-kVA-Wechselrichter, WR) geben Aufschluss über das Verhalten im Betriebs- bzw. Fehlerfall. Die gewonnenen Erkenntnisse über das Verhalten des WR im Normalbetrieb und im Fehlerfall werden anschließend durch Versuche in einer realen Hausinstallation bestätigt. Durch die Versorgung der bestehenden Hausanlage über den Wechselrichter werden im Inselnetzbetrieb ausgewählte Lasten im Normalbetrieb gespeist. Weitere Untersuchungen im Inselnetz zeigen das Verhalten des Wechselrichters und die Funktionalität der in der Hausinstallation eingesetzten Schutzelemente wird nachgewiesen.

3.5 Aufbau der Arbeit

Das in Abbildung 1 dargestellte Mindmap dient der Übersicht der durchgeführten Arbeiten in den einzelnen Arbeitspaketen.

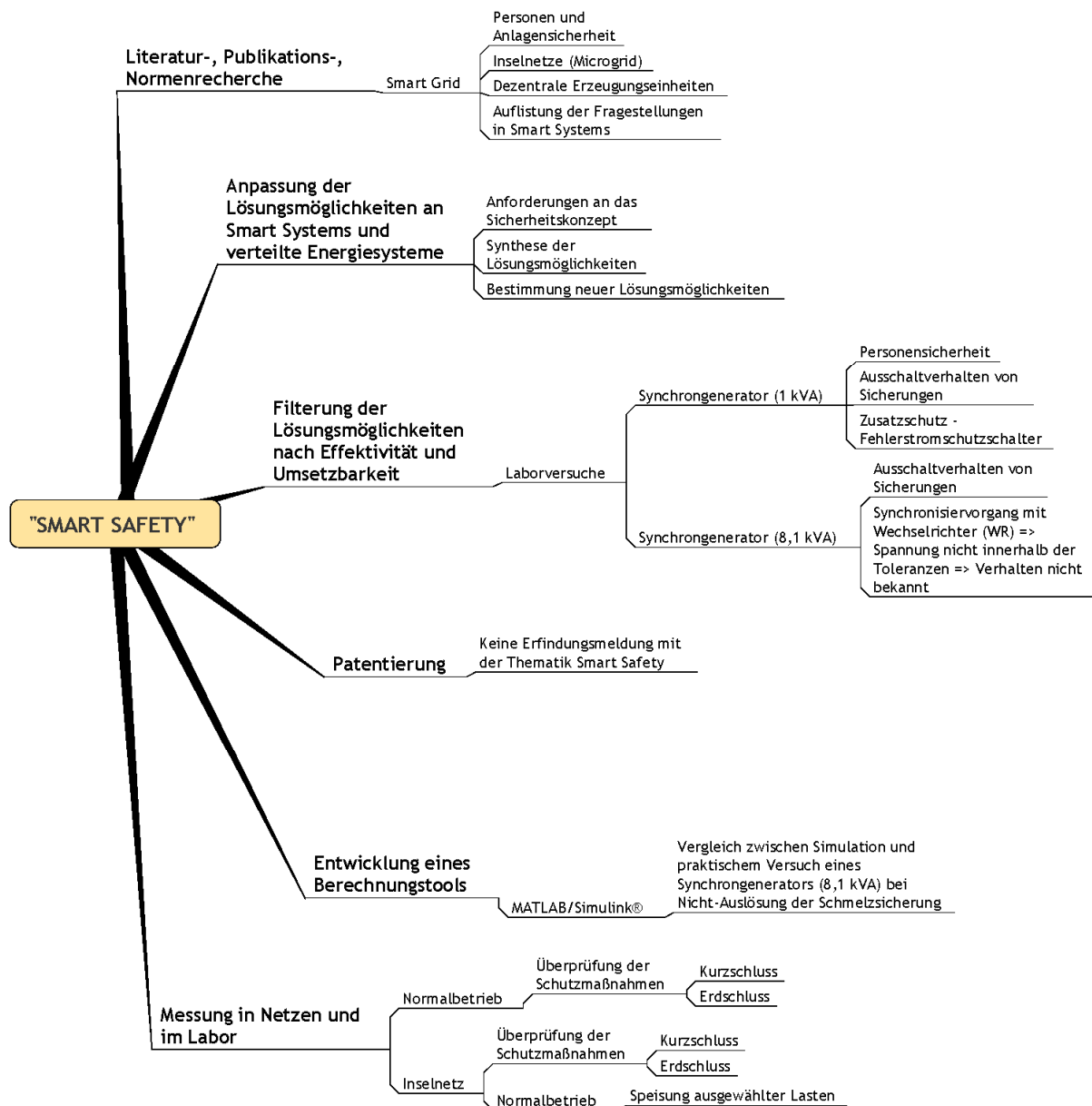


Abbildung 1 Mindmap der einzelnen Arbeitspakete

4 Inhaltliche Darstellung

4.1 Literaturrecherche und Recherche vorhandener Lösungsmöglichkeiten

Im Zuge der Vorstudie werden nach einer ausführlichen Normenrecherche Fragestellungen im Zusammenhang mit der Schutzthematik in Smart Systems bzw. Smart Grids dargestellt.

Die Recherche nach vorhandenen Lösungen zur Wahrung der Personen- und Anlagensicherheit in Smart Systems zeigte vereinzelte Lösungsansätze betreffend der neuen Herausforderungen wie z.B. bidirektionale Stromflüsse auf. Die Wahrung der Personensicherheit steht im Vordergrund beim Projekt „Smart Safety“. Hinsichtlich Normen, Standards und Betriebsvorschriften für Smart-Grid-Systeme und kontrollierter Inselnetzbildung gibt es erst vereinzelt geeignete Konzepte; künftig werden deshalb große Herausforderungen an die Normungsgremien gestellt werden müssen.

Aus der Literatur- und Publikationsrecherche können folgende Werke und Veröffentlichungen, die sich mit der Thematik - Sicherheit und Schutz - in Smart Grids beschäftigen, angeführt werden. Bekannte Problematiken und Fragestellungen werden in diesem Kapitel aufgelistet und bilden die Grundlage für die Definition von Fragestellungen im Zusammenhang mit der Thematik des Projekts „Smart Safety“.

- Johann Jäger, Timo Keil, Thomas Degner, Nils Schäfer: „Schutztechnik in DER Netzen“, 13. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik 2008
- Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner, Dr.-Ing. Christine Schwaeggerl, Dr.-Ing. Rudolf Simon: „Smart Grids: Auswirkung auf die Schutztechnik“, Tagungsband Schutz- und Leittechnik 2008 (ETG-FB 115), Vortrag aus dem 3. ETG-/BDEW-Tutorial, Fulda, 11.11.2008 – 12.11.2008
- L. Fickert, G. Achleitner, E. Schmutzner, N. Achleitner: „Schutztechnik für dezentrale Energiesysteme“ in Elektrotechnik und Informationstechnik (e&i) Heft-Nr.: 3/2009 Jahrgang 126, Seite: 83-87, Springer-Verlag, 2009
- L. Fickert, E. Schmutzner, M. Aigner, W. Friedl: „Personensicherheit in autonomen Niederspannungsinseln“ in Elektrotechnik und Informationstechnik (e&i) Heft-Nr.: 3/2009 Jahrgang 126, Seite: 88-93, Springer Verlag 2009

Der folgende Literaturverweis beschäftigt sich mit den Problematiken und Herausforderungen eines Microgrids; die Veröffentlichung basiert auf einer Untersuchung eines ganzheitlichen Systemansatzes.

- Alfred Einfalt, Christoph Leitinger, Dietmar Tiefgraber, Sara Ghaemi: „ADRES Concept – Micro Grids in Österreich“, 6. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, IEWT 2009

Folgende abgeschlossene Projekte sind in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Projektverantwortlichen des Projekts „Smart Safety“ in der 1. Berichtslegungsperiode entstanden. Teile der aufgelisteten Projekte wurden vom Projektteam des Projekts „Smart Safety“ entwickelt und werden in der gegenständlichen Berichterlegung detailliert ausgearbeitet.

- Roadmap Smart Grids Austria: Der Weg in die Zukunft der elektrischen Stromnetze, Nationale Technologieplattform Smart Grids Austria, Andreas Lugmaier, Helfried Brunner, Wolfgang Prügler, Nathalie Glück, Friederich Kupzog, Hubert Fechner, Ursula Tauschek, Thomas Rieder, Karl Derler, Thomas Mühlberger u.a., FFG Projektnummer: 817635
- Energie der Zukunft, Sim Tech Concept, Konzeption des SimTech Labors zur Echtzeitsimulation von elektrischen Netzen und Komponenten, FFG Projektnummer: 815625

Parallel zum Projekt Smart Safety wurde in der 2. Berichtslegungsperiode das folgende Projekt mit der Thematik „Smart Grids und neue Herausforderungen“ gestartet:

- Smart Grids ERA-Net 2010, Power Quality and Safety Requirements for People and Electrical Equipment in Smart Grid Customer Domain

Weitere laufende Projekte:

- Neue Energien 2020, 3. Ausschreibung, Smart Loss Reduction, Steigerung der Effizienz von Verteilnetzen durch zeitgetreue Erfassung und optimierte Steuerung der Lastströme, FFG Projektnummer: 825487
- Neue Energien 2020, 3. Ausschreibung, Smart Efficiency, CO₂ Reduktion auf Basis automatisierter Effizienz- und Energieanalyse für Haushalte mit Hilfe von Smart Metern, FFG Projektnummer: 825407
- Neue Energien 2020, 4. Ausschreibung, KRIN, Smart Emergency Grid – Innovative dezentrale Notstromversorgungsnetze mittels Smart Metern, FFG Projektnummer: 829954
- Neue Energien 2020, 4. Ausschreibung, ECONGRID, Smart Grids und volkswirtschaftliche Effekte: Gesamtwirtschaftliche Bewertung von Smart-Grids-Lösungen, FFG Projektnummer: 829847

Die Europäische Standardisierungsorganisation (ESO) arbeitet aufgrund des weitreichenden Wirkungsbereichs der Smart Grid Technologie mit den Europäischen Normungsgremien CEN, CENELEC und ETSI an einer Priorisierungsliste zur einheitlichen Entwicklung der Smart Grid Komponenten. Bis zum Jahr 2012 wird ein Entwurf der Smart Grid Task Force validiert und anschließend durch die einzelnen Europäischen Normungsgremien im Detail untersucht [38].

4.2 Anpassung der Lösungsmöglichkeiten an Smart Systems und verteilte Energiesysteme sowie Bestimmung neuer Lösungen

Das im Folgenden vorgestellte Konzept bildet die Grundlage für Simulationen, Versuche in realen Netzen und weiterführende Analysen. Simulationen und Versuchsaufbauten in kontrollierter Testumgebung liefern Erkenntnisse, um bestehende Schutzkonzepte an die neuen Anforderungen (bidirektionale Lastflüsse bzw. Kurzschlussstromflüsse, zu geringe Kurzschlussleistungen dezentraler Erzeugungseinheiten) anzupassen.

Zur Erfüllung der Schutz- und Sicherheitsfunktionen sind die folgenden Forderungen einzuhalten [17]:

1. Bereitstellung eines ausreichend hohen Kurzschlussstroms, damit die Schutzeinrichtung, positioniert an der vorgeschriebenen Stelle im System, ausreichend schnell abschaltet.

Bei Smart Systems wird im Falle eines für die heute üblicherweise eingesetzten Schutzeinrichtungen zu geringen Kurzschlussstroms, neben dem Konzept des „Safety Blocks“ [4], welcher die Bereitstellung eines angemessenen Kurzschlussstroms über den Parallelauf einer elektrischen Maschine vorsieht, die zur Verfügungsstellung fehlender Kurzschlussleistung aus Speichertechnologien im kombinierten Einsatz mit fluktuierenden dezentralen Erzeugungseinheiten in weiterführenden Projekten untersucht werden.

2. Niederohmig geschlossener Fehlerstrom-Pfad

Um der Forderung eines niederohmig geschlossenen Fehlerstrom-Pfads zu entsprechen, sind die Leitungsart, -querschnitte und -längen und damit die Impedanzen der Fehlerstromschleifen maßgebend.

Bei Auftreten eines Fehlers zwischen dem Außen- und Schutzleiter muss der Sternpunkt herausgeführt und niederohmig geerdet sein, damit sich der Fehlerstrom über den Sternpunkt schließen und sodann die Schutzeinrichtung ansprechen kann – Abbildung 2.

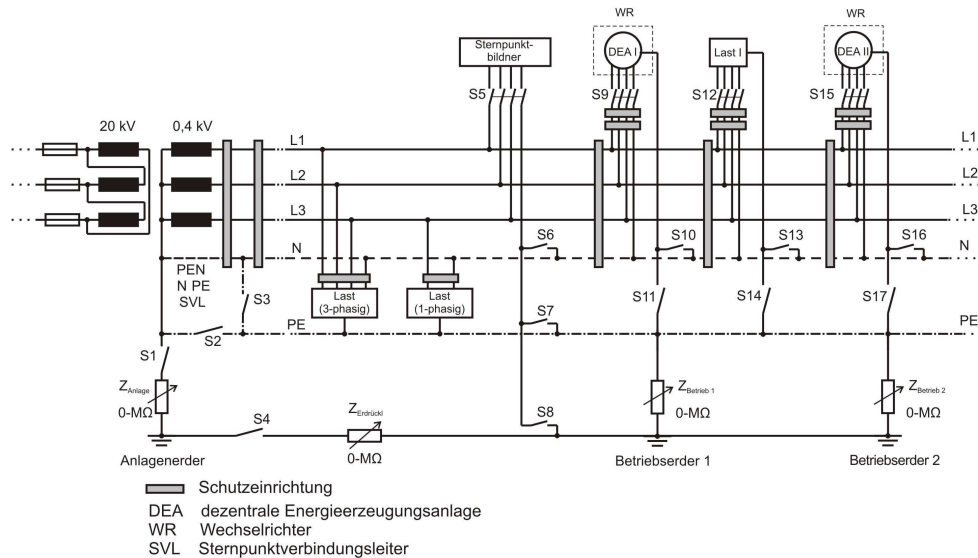
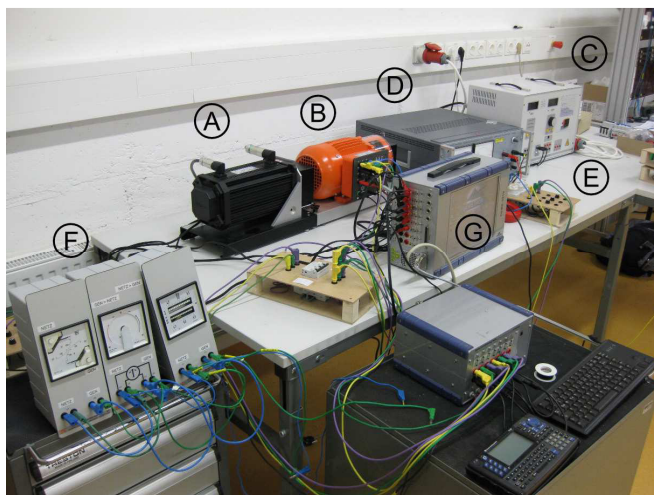


Abbildung 2 Konzept zur Nachbildung verschiedener Niederspannungssysteme (TN, IT, TT etc.) für schutztechnische Betrachtungen und Untersuchungen hinsichtlich der Sicherheit von Personen und Sachgütern [5],[6],[7],[36]

4.3 Filterung der Lösungsmöglichkeiten nach Effektivität und Umsetzbarkeit

Ziel der folgenden Untersuchungen ist es, bisher eingesetzte Schutzmaßnahmen auf deren Funktionalität im Netz- und Inselnetzbetrieb zu überprüfen. Basierend auf Versuche im Smart-Grid-Labor des Instituts für Elektrische Anlagen sowie im Labor des Instituts für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen der Technischen Universität Graz durchgeführt.



- | | |
|---|-----------------------------------|
| A | Antriebsmaschine |
| B | Synchrongenerator |
| C | Servo-Maschinenprüfstand |
| D | Gleichstromquelle-Erregerspannung |
| E | Schutzmodul |
| F | Synchronisierungseinheit |
| G | Messgerät/Datenerfassung |

Abbildung 3 Testaufbau im Smart-Grid-Labor des Instituts für Elektrische Anlagen [32]

Grundlegende Untersuchungen über das Verhalten im Betriebs- bzw. Fehlerfall im Netzparallel- und Inselnetzbetrieb von Synchrongeneratoren (1 kVA) bei herausgeführtem und niederohmig geerdeten bzw. nicht-herausgeführtem Sternpunkt bei Einspeisung in das Niederspannungsnetz (TN-System) wurden untersucht – siehe Abbildung 4. Anhand des dargestellten Laboraufbaus konnte nachgewiesen werden, dass die konventionell

eingesetzten Schutzmaßnahmen, d.h. auf die Kurzschlussleistung des Generators ausgelegte Schmelzsicherungen, nicht für den sicheren und zuverlässigen Betrieb im Inselnetzbetrieb geeignet sind, da die Kurzschlussströme zu gering sind.

Da die charakteristischen Zeitkonstanten (subtransiente Zeitkonstante T_d'' , transiente Zeitkonstante T_d') des 1-kVA-Synchrongenerators sehr kurz ist, klingt der gelieferte Strom, entsprechend einer Exponentialfunktion, rasch auf den stationären Kurzschlussstrom I_k ab. Die Zeitkonstanten T_d'' und T_d' sind zu gering, um die vorgelagerte, auf den Nennstrom der Maschine ausgelegte, Sicherung zum Schmelzen zu bringen [32].

Fehlerstromschutzschalter

Aufgrund der Nichtauslösung der eingesetzten Schmelzsicherung wurde diese durch einen entsprechend dimensionierten Fehlerstromschutzschalter ($I_{\Delta N}=30$ mA) erweitert. Die Funktionalität des Fehlerstromschutzschalters (Summenstrom-Prinzip, d.h. der Fehlerstromschutzschalter detektiert die von Null abweichende Stromsumme in den Hauptstrompfaden) ist jedoch nur bei herausgeführtem und geerdetem Sternpunkt des Synchrongenerators gegeben.

Untersucht wurden Fehlerstromschutzschalter vom Typ AC (wechselstromsensitiv) sowie vom Typ B (allstromsensitiv). Beide Typen lösen bis zu einem Erdungswiderstand von $7,5 \Omega$ (gemäß ÖVE/ÖNORM EN 62305, Erdungswiderstand max. 10Ω) aus. Bei einem Erdungswiderstand von 100Ω (gemäß ÖVE/ÖNORM E 8001-1) und der daraus resultierenden Stromaufteilung zwischen dem Schutzleiter (PE) und der Erde (E) kommt es zu keiner Auslösung der untersuchten Fehlerstromschutzschalter vom Typ AC und B [32].

4.4 Entwicklung eines Berechnungstools

Hierbei wird das im Abschnitt 4.2 vorgestellte Konzept zur Nachbildung von Netzsystemen, Schutzeinrichtungen und die Einbindung dezentraler Erzeugungseinheiten unterschiedlicher Leistungsklassen in der Simulationsumgebung MATLAB/Simulink® (SimPowerSystems™) vorgestellt. Damit werden die Auswirkungen einer Nicht- bzw. Fehlauslösung aufgrund zu geringer Kurzschlussleistung und bidirektionaler Last- und Stromflüsse dargestellt bzw. die Ergebnisse aus den Versuchen mit denjenigen der dynamischen Simulation verglichen.

Um das Verhalten der Schutzeinrichtungen in einem Inselnetz (Microgrid) bei einem Erd- oder Kurzschluss zu untersuchen, wurde eine dezentrale Erzeugungsanlage (8,1-kVA-Synchrongenerator) direkt geerdet und damit ein Microgrid ($U=\text{konst.}$, $f=\text{konst.}$) gespeist. In einem weiteren Schritt sollte der Synchrongenerator mit einer nicht-rotierenden dezentralen Erzeugungseinheit (5-kVA-Inselnetz-Wechselrichter,) mit dem Synchrongenerator synchronisiert werden. Aufgrund der hohen transienten Überspannungen – siehe Abbildung 5 – bei Abschmelzen der Schmelzsicherung war es nicht möglich, das Microgrid (bestehend aus Synchrongenerator und WR) zu betreiben, um den Inselnetz-Wechselrichter nicht zu gefährden, da das Verhalten des WRs bei einer Spannung außerhalb des Toleranzbereichs der EN 50160 [19] nicht bekannt ist. Um die auftretenden Überspannungen durch das

Abschmelzen der Sicherung zu begrenzen, wurde versucht, die Überspannungen mit Kondensatoren bzw. handelsüblichen Überspannungsableitern im Messaufbau zu reduzieren. Jedoch konnte gezeigt werden, dass diese Maßnahmen die Überspannungen nicht hinreichend verringern.

Mittels eines Stoßkurzschlussversuchs bei Nennspannung U_n des Synchrongenerators wurden die charakteristischen Parameter (T_d'' , T_d' , X_d'' , X_d'), die im Folgenden für die dynamische Simulation benötigt werden, erfasst. In Abbildung 4 ist der Kurzschlussstromverlauf des realen Versuchs (bei einer Nichtauslösung einer 25-A-Schmelzsicherung) und der Kurzschlussstromverlauf der dynamischen Simulation unter Berücksichtigung der ermittelten charakteristischen Parameter dargestellt.

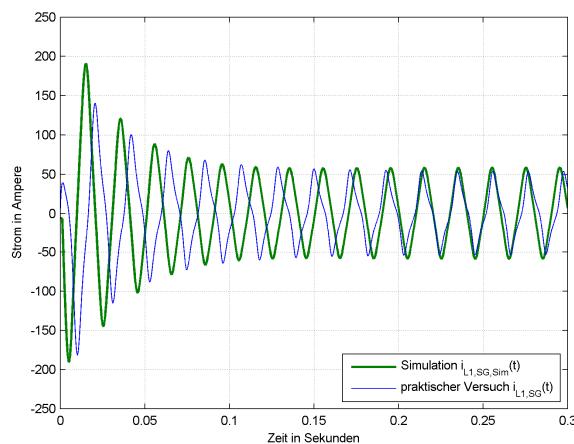


Abbildung 4 Kurzschlussstromverlauf der Simulation (MATLAB/Simulink®) und des realen Synchrongenerators (8,1 kVA) bei einem 1-poligen Kurzschluss

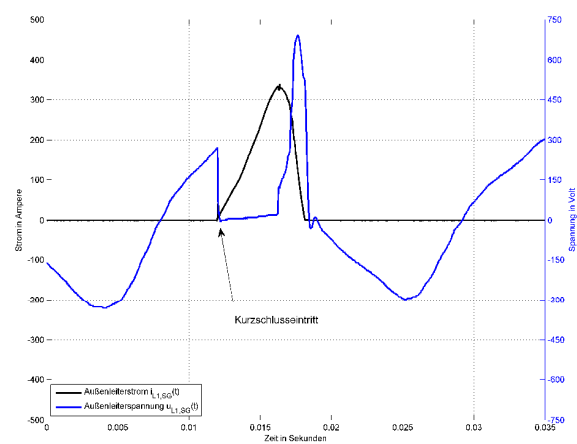


Abbildung 5 Kurzschlussstromverlauf eines Synchrongenerators (8,1 kVA) bei Auslösung einer 10 A-Diazed DII-Schmelzsicherung, verursacht durch einen 1-poligen Kurzschluss

Aus der Abbildung 4 ist ersichtlich, dass der Kurzschlussstromverlauf bei einem 1-poligen Kurzschluss durch die Simulation (MATLAB/Simulink®) dem Kurzschlussstromverlauf des realen Synchrongenerators annähernd entspricht. Die beiden Verläufe weisen eine Frequenzabweichung auf, diese ist auf die – im Gegensatz zur Simulation – nicht konstante Frequenz (Drehzahl) bzw. auf die Belastung beim realen Versuch bei Eintritt des Kurzschlusses zurückzuführen.

In der Planungsphase der Versuche wurde das Verhalten des Synchrongenerators mittels einer dynamischen Simulation nachgebildet. Da der Abschmelzvorgang der Sicherung (Löschung des Zünddrahts in Folge des Abschmelzens durch den Lichtbogen) sehr schwer nachzubilden ist, konnte die Problematik der auftretenden Überspannungen durch die Simulation nicht nachgewiesen werden.

Die Abbildung 6 zeigt den Ausschaltvorgang (gesamte Ausschaltdauer t_A) einer Schmelzsicherung bestehend aus der Schmelzzeit t_S und der Löschzeit t_L .

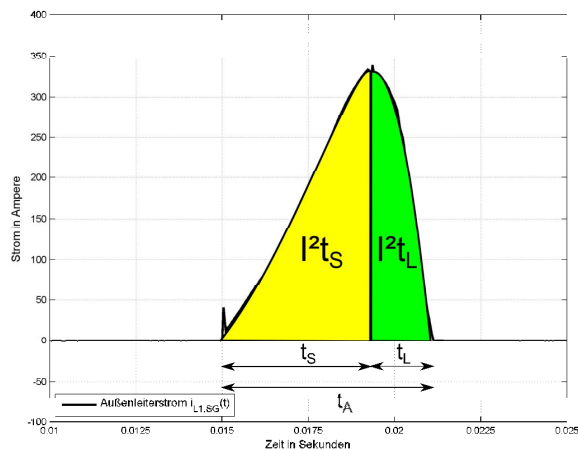


Abbildung 6 Darstellung der Schmelzzeit t_s , Löschzeit t_L und der gesamten Ausschaltzeit t_A der untersuchten 10 A-Diazed DII-Schmelzsicherung

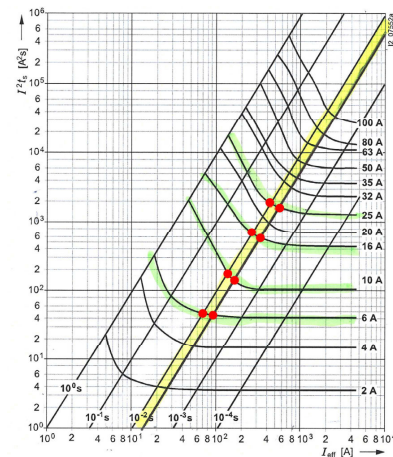


Abbildung 7 Schmelzintegrale I^2t_s -Werte (Joule-Integral) der untersuchten DIAZED DII Schmelzsicherungen [40]

Die Auslösung von Sicherungen, um die Personensicherheit bzw. die Beeinflussung anderer Erzeuger bzw. Verbraucher im Elektroenergiesystem zu gewährleisten, erfolgt im subtransienten Zeitbereich des Synchrongenerators (innerhalb von wenigen ms). Durch die Aufzeichnung der gemessenen Kurzschlussströme $i_{L1,SG}(t)$ und der Schmelzzeiten t_s kann das Schmelzintegral I^2t_s berechnet werden. Die Schmelzintegrale I^2t_s für den Zeitbereich von 5 ms – 10 ms wurden aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen, siehe Abbildung 7 bzw. Abbildung 8.

gemessen			berechnet	gemäß Datenblatt	
Si-Typ	Schmelzzeit	Strom	Schmelzintegral	Schmelzintegral ¹⁾	Schmelzintegral ²⁾
-	t_s	$\hat{i}_{L1,SG}$	I^2t_s	I^2t_s	I^2t_s
-	[ms]	[A]	[A ² s]	[A ² s]	[A ² s]
6 A	7,52	232	245	48	45
6 A	4,55	195	78		
10 A	4,24	338	200	190	140
10 A	4,48	312	193		
16 A	9,60	425	903	700	600
16 A	8,48	400	782		
25 A	10,00 ³⁾	550 ³⁾	1513	1700	1900

¹⁾ Abschaltzeit **10 ms** aus Kennlinie

²⁾ Abschaltzeit **5 ms** aus Kennlinie

³⁾ Keine Auslösung der 25 A Schmelzsicherung – extrapolierte, angenommene Werte

Tabelle 1: Gemessene Spitzenwerte des Stroms $\hat{i}_{L1,SG}$, der Schmelzzeit t_s und gemessene Werte des Schmelzintegrals $\hat{i}_{L1,SG}$ (Joule-Integral) aus der Sicherungskennlinie

Die Abbildung 7 zeigt die Schmelzintegrale I^2t_s der verwendeten Sicherungen (grün markiert), zusätzlich wurde die benötigte Schmelzenergie für eine Auslösung bei 5 ms eingezeichnet. Die roten Punkte zeigen die Schnittpunkte der untersuchten Sicherungen im Zeitbereich von 5 – 10 ms.

Die Schmelzintegrale (Joule-Integrale) werden zur Koordinierung von Sicherungen bei einer Auslösezeit von < 100 ms verwendet.

4.5 Netz- und Labormessungen

Um das Verhalten dezentraler Erzeugungsanlagen im Parallel- sowie im Inselnetzbetrieb zu ermitteln, werden vorab Versuche mit einem 5-kVA-Wechselrichter im Smart-Grid-Labor des Instituts für Elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz durchgeführt.

Durch Versuche in einem realen Netz wurden die Bedingungen und Grenzen für einen sicheren Betrieb von Inselnetzen bei Einspeisung durch dezentrale, besonders kurzschlussstromschwache Erzeuger (Wechselrichter) aufgezeigt.

Um das Verhalten eines 1-phasigen 5-kVA-Wechselrichters bei Auftreten unterschiedlicher Fehlertypen im TN-C-S System (Hausinstallation) im Inselnetz zu untersuchen, wurden Versuche in einem realen Netz durchgeführt, um die Bedingungen und Grenzen für den sicheren Betrieb von Inselnetzen bei Einspeisung durch dezentrale Erzeugungseinheiten, insbesondere kurzschlussstromschwache Wechselrichter, aufzuzeigen. Die Batterien, die an den Wechselrichter angeschlossen sind, dienen einerseits als Speicher, um im Inselnetz die Energie für den Lastausgleich zu speichern bzw. andererseits dazu, um im Kurzschlussfall einen Kurzschlussstrom durch den Wechselrichter zu liefern.

Abbildung 8 zeigt die untersuchte Hausinstallation mit den bestehenden Schutzgeräten (z.B. den für die Einspeisung über den WR vorgesehenen Leitungsschutzschalter LS B 16 A, dem Wechselrichter (WR) inkl. Batterien, Abgänge der Lasten (L_1 , L_2 , L_3) sowie den Positionen (1 & 2) der untersuchten Fehler. Im Rahmen der Anpassung der Hausanlage für die Einspeisung über dezentrale Erzeugungseinheiten wurde ein Umschalter (U) (Netz-/Wechselrichter-Einspeisung) mit einem zusätzlichen Fehlerstromschutzschalter (FI-19 (30 mA, nicht-selektiv) installiert.

Kurzschluss zwischen dem Außen- und dem Neutralleiter eingelegt, die vorschriftenkonforme Auslösung des Leitungsschutzschalters der Type C 16 A konnte nachgewiesen werden.

Inselnetzbetrieb – Versorgung der Hausanlage durch den WR

Normalbetrieb: Speisung ausgewählter typischer Lasten

Für die Versorgung der Lasten (Bügeleisen, Heizlüfter, Computer, Beleuchtung, Staubsauger) wird durch Betätigung des Umschalters U die Anlage vom öffentlichen Netz getrennt und im Inselnetz weiter betrieben. Das Verhalten der Quelle (WR) sowie der einzelnen Verbraucher zeigt keine Auffälligkeiten; somit ist die Versorgung der Lasten im Inselnetzbetrieb gewährleistet.

Im Folgenden werden ein Erdschluss sowie ein Kurzschluss in der vom Wechselrichter versorgten Hausanlage aufgeschaltet.

Fehler: Erdkurzschluss zwischen dem Außenleiter L_1 und dem Schutzleiter PE

Abbildung 9 zeigt die Verläufe des Außenleiterstroms $i_{L1,WR}(t)$ und des Schutzleiterstroms $i_{PE,WR}(t)$ bei Eintritt eines Fehlers zwischen dem Außenleiter L_1 und dem Schutzleiters PE. Der in der Hausinstallation befindliche Fehlerstromschalter (FI-4/Kellergeschoss) und der zusätzlich benötigte, durch die Erweiterung des Elektroinstallations-Verteilers, Fehlerstromschutzschalter (FI-19/Einspeisung WR) detektieren den Fehler und trennen die annähernd zeitgleich den WR von der Hausanlage. Durch die Auslösung beider Fehlerstromschutzschalter (FI-4 und FI-19) werden alle Verbraucher im Erdgeschoss und jene des Obergeschosses von der Quelle (WR) getrennt.

Durch die schnelle Detektion des Fehlers und der daraus resultierenden Abschaltung – in Abbildung 10 ersichtlich – ist kein merklicher Spannungseinbruch ersichtlich.

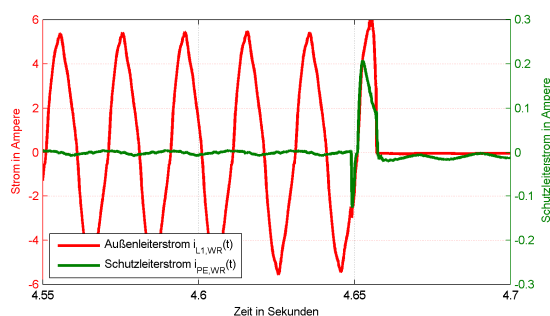


Abbildung 9 Stromverläufe des Außen- und Schutzleiterstroms bei zeitgleicher Ausschaltung durch den FI-4/FI-19 der Type B 30 mA des fehlerbehafteten Stromkreises (Erdschluss L_1 -PE)

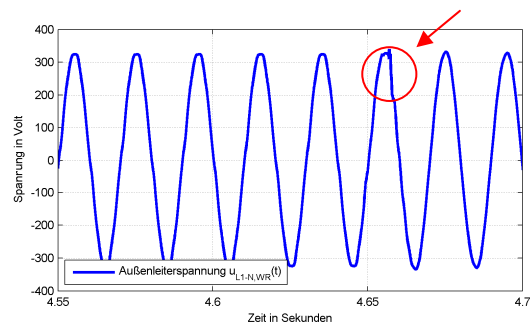


Abbildung 10 Spannungsverlauf des Außenleiters am WR bei zeitgleicher Ausschaltung durch den FI-4/FI-19 der Type B 30 mA des fehlerbehafteten Stromkreises (Erdschluss L_1 -PE)

Inselnetzbetrieb - Fehler: Kurzschluss zwischen dem Außenleiter L_1 und dem Neutralleiter N

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse eines Versuchs mit einem Kurzschluss zwischen L_1 und N einerseits mit dem vom Wechselrichterhersteller vorgeschriebenen Leitungsschutzschalter der Type B 16 beschrieben. Andererseits wird dieser überbrückt, um die Problematik eines fehlenden Leitungsschutzschalters darzustellen.

In Abbildung 11 sind der Außenleiterstrom $i_{L1,WR}(t)$ und die Außenleiterspannung $u_{L1-N,WR}(t)$ bei Eintritt des Fehlers ersichtlich. Der vom WR-Hersteller geforderte Leitungsschutzschalter LS B 16 A trennt den WR von der Hausanlage.

Abbildung 12 zeigt den Verlauf des Außenleiterstroms $i_{L1,WR}(t)$ und der Außenleiterspannung $u_{L1-N,WR}(t)$ bei fehlendem, vom WR-Hersteller vorgeschriebenem Leitungsschutzschalter LS B 16 A. Durch diese Überbrückung kann gezeigt werden, dass der in der bestehenden Hausinstallation verwendete Leitungsschutzschalter vom Typ C 16 A aufgrund des hohen Auslösestroms ($10 \cdot I_n$) zur Absicherung des Wechselrichters nicht geeignet ist. Der Fehler musste von Hand gelöst werden.

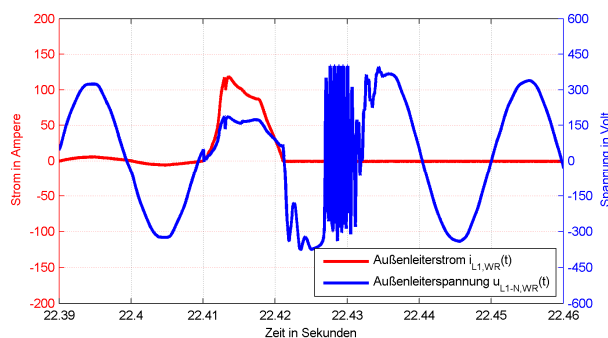


Abbildung 11 Verläufe des Außenleiterstroms $i_{L1,WR}(t)$ und der Außenleiterspannung $u_{L1-N,WR}(t)$ bei Ausschaltung durch den LS B 16 A des fehlerbehafteten Stromkreises (Kurzschluss L_1 -N)

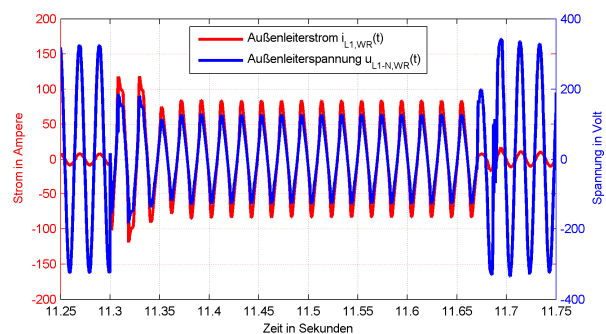


Abbildung 12 Verläufe des Außenleiterstroms $i_{L1,WR}(t)$ und der Außenleiterspannung $u_{L1-N,WR}(t)$ – ohne den herstellereits empfohlenen LS B 16 A – mit händischer Fehlerabschaltung zum Zeitpunkt $t = 11,67$ s

Weiterführende Informationen können den Diplomarbeiten [32], [33] der zweiten Berichtslegungsperiode sowie der e & i-Veröffentlichung mit dem Titel: „Sicherheits- und schutzrelevante Aspekte im Parallel- bzw. Inselbetrieb im Niederspannungsnetz“ entnommen werden [35].

Selektivitätsnachweis - Auslösekennlinien

In Abbildung 13 sind die Auslösekennlinien des Leitungsschutzschalters der Type B 16 A ($5 \cdot I_n$), der Type C 16 A ($10 \cdot I_n$) sowie die Abschaltcharakteristik des untersuchten Wechselrichters dargestellt, um das Nicht-Auslösen des in der Hausinstallation verwendeten LS der Type C 16 A zu erklären. Der maximal gelieferte Strom des Wechselrichters reicht aus, um den LS der Type B 16 A auszulösen, jedoch nicht den in der Hausinstallation bestehenden LS der Typ C 16 A, der vorschriftskonform aus Gründen der Versorgungszuverlässigkeit in die untersuchte Anlage eingebaut wurde.

Werden über einen Wechselrichter im Inselnetzbetrieb zwei bzw. mehrere Verbrauchergruppen versorgt, ist unter der Annahme, dass bestehende Verbrauchergruppen mit einem Leitungsschutzschalter der Type C 16 abgesichert sind, die Selektivität nicht gegeben (Abbildung 14), da bei einem Kurzschluss zwischen dem Außenleiter und dem Neutraleiter der vorgeschaltete LS B 16 A des WR auslöst und somit die Quelle von allen Verbrauchergruppen (fehlerbehaftete sowie fehlerfreie) getrennt wird. Aufgrund dieser Trennung wird die Lokalisierung des Fehlerorts zusätzlich erschwert [35], [33].

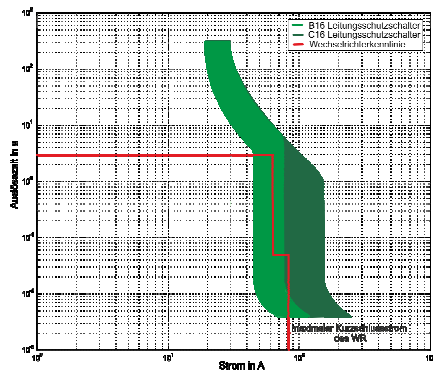


Abbildung 13: Auslösekennlinien LS B 16 A, LS C 16 A und Abschaltcharakteristik des Wechselrichters [35]

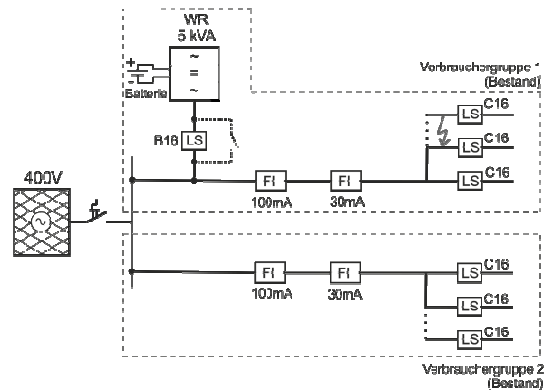


Abbildung 14: Beispiel zur Erklärung der Selektivitätsproblematik [35]

5 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Durch einen zu erwartenden erhöhten Anteil der Energiebereitstellung aus kleinen bis mittleren dezentralen Erzeugungseinheiten kann bei Ausfall der übergeordneten Energieversorgung eine Netzhinsel (Inselnetz mit einem Erzeuger bzw. mit mehreren verteilten Erzeugern) grundsätzlich weiter versorgt werden.

Untersuchungsergebnisse im Labor sowie in einer realen, typischen Hausinstallation zeigen, dass sowohl die notwendige Kurzschlussleistung zur Auslösung der Schutzeinrichtungen (bisher Sicherungen oder Leitungsschutzschalter, in Zukunft u.U. geeignete elektronische Schutzeinrichtungen), als auch die Sternpunktbehandlung von Generatoren kleiner bis mittlerer Leistung sowie auch der Personen- und Sachgüterschutz in Netzen, die von kurzschlussstromschwachen Erzeugern versorgt werden (z.B. Wechselrichter), von besonderer Wichtigkeit sind.

Hinsichtlich der Gewährleistung der Sicherheit von Personen und Sachgütern sowie der Selektivität, als Voraussetzung für den sicheren und zuverlässigen Betrieb von elektrischen Netzen mit vermehrt dezentraler Einspeisung, konnte im Inselnetzbetrieb nachgewiesen werden, dass eine ordnungsgemäße Zeit-Staffelung des zur Absicherung des Wechselrichters vorgesehenen Leitungsschutzschalters mit den in der Hausinstallation derzeit üblichen und untersuchten Schutzeinrichtungen nicht möglich ist.

„Highlights“ des Projekts Smart Safety

Die Schwerpunkte des Projekts Smart Safety liegen auf Versuchen in kontrollierter Versuchsumgebung sowie auf Versuchen in einem realen Netz. Durch die Nachbildung von Betriebs- und Fehlerszenarien konnte die Funktionalität bestehender Schutzkonzepte in einer elektrischen Anlage einerseits im konventionellen Netzbetrieb und andererseits bei Versorgung der Anlage über eine kurzschlussstromschwache dezentrale Erzeugungseinheit beschrieben werden. Mit den Erkenntnissen aus den Untersuchungen ist es möglich, das beschriebene Konzept zur Nachbildung verschiedener Niederspannungssysteme (TN, IT, TT etc.) für schutztechnische Betrachtungen und Untersuchungen hinsichtlich der derzeit möglichen Gefährdung von Personen und Sachgütern weiterzuverfolgen, sicherheitskritische Aspekte nachzuweisen, die gewonnenen Erkenntnisse in ein Berechnungstool zu implementieren und damit die Funktionalität von in Niederspannungsnetzen eingesetzten Schutzsystemen bei vermehrter dezentraler Erzeugung voranzutreiben.

6 Ausblick und Empfehlungen

Für einen künftigen sicheren und zuverlässigen Betrieb von Niederspannungsnetzen mit der Option der Inselnetzbildung müssen neue Netz-, Anlagenbetriebs- und Schutzszenarien sowie -konzepte entwickelt werden, sodass sowohl bestehende als auch adaptierte bzw. neu errichtete Netze und Anlagen die Anforderungen für den sicheren, selektiven und effizienten Netzparallel- sowie Inselnetzbetrieb erfüllen können.

Um erneuerbare (stark fluktuierende) Quellen noch besser zu nutzen, sind neben der erhöhten Einbindung in das Verteilernetz auch noch Fragen betreffend der Speicherung und der Primärregelung zu klären.

Durch das Zusammenfügen der dezentralen Erzeugungseinheiten, Speicher und der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) werden gesamtheitliche Systeme geschaffen, welche einerseits einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele aber andererseits den Erzeuger (Verteilnetzbetreiber) und den Kunden eine neue Rolle zukommen lassen. Aufgrund von notwendigen Umstrukturierungsmaßnahmen in der Verteilnetzebene wird der Betreiber ein weiteres Tätigkeitsfeld abdecken müssen. Energiedienstleistungen wie z.B. Energie- und Lastmanagement werden vom Verteilnetzbetreiber bereitgestellt bzw. diese Dienstleistung wird vermehrt von externen Anbietern angeboten und in Anspruch genommen werden. Durch die Schaffung von neuen anreizorientierten Tarifen für den Kunden soll das energetische Einsparpotential in Haushalten gesteigert werden. Durch die kombinierte Einbindung von dezentralen Erzeugungseinheiten, Speicher und Last- und Speichermanagement werden Gebäude ein Einzelbaustein von Smart Grids und tragen einen wesentlichen Beitrag zur Minimierung von problematischen Lastspitzen bei.

Durch weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Geräten und Gebäuden geht die Entwicklung hin zu einem Smart Homes bzw. zu einem Smart Building.

7 Literaturverzeichnis

Sofern Verweise in der gegenständlichen Veröffentlichung nicht direkt referenziert sind, sind die angeführten Quellen als weiterführende Literatur zu verstehen.

- [1] Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, 20 und 20 bis 2020: „Chancen Europas im Klimawandel“, 2008-23-01, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0030:FIN:de:PDF>, letzter Aufruf: 25.07.2011
- [2] Smart Grids Austria: „Die österreichische Technologieplattform zum Thema Smart Grids“, <http://www.smartgrids.at>, letzter Aufruf: 25.07.2011
- [3] L. Fickert, E. Schmutzner: „Sicherheit und Zuverlässigkeit in Microgrids und Smart Grids“, EnInnov08, Kurzfassungsband 10. Symposium Energieinnovation, Seite: 214, Graz, 2008
- [4] L. Fickert, E. Schmutzner, M. Aigner, W. Friedl: „Personensicherheit in autonomen Niederspannungsinselfn“, Elektrotechnik und Informationstechnik (e&i), Heft-Nr.: 3/2009 Jahrgang 126, Seite: 88-93, Springer Verlag, 2009
- [5] M. Aigner, Ch. Raunig, E. Schmutzner, L. Fickert: "Smart Grids – Neue Anforderungen an den Personen- und Anlagenschutz", Proceedings 11. Symposium Energieinnovation, Alte Ziele – Neue Wege, vol.1, Seite: 336-337, Graz, 2010
- [6] M. Aigner, Ch. Raunig, E. Schmutzner, L. Fickert, "Consideration of safety requirements for people and electrical equipment in Smart Grids", CIRED Workshop, Sustainable Distribution Asset Management & Financing, Lyon, Frankreich, 7.-8. Juni 2010
- [7] M. Aigner, Ch. Raunig, E. Schmutzner, L. Fickert, "Smart Grids – Consideration regarding protection of electrical installations and safety in case of decentralized power supply", Komunalna Energetika, 19th International Expert Meeting, Maribor, Slowenien, 11.-12. Mai 2010
- [8] M. Aigner, C. Raunig, L. Fickert, H. Hauer, E. Schmutzner, W. Friedl: „Sicherheit in Smart Grids / Normen und Realisierungsmöglichkeiten“, Vortrag Smart Grid Week Salzburg, 13. - 15. Mai 2009
- [9] E-Control: „TOR – Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen – Übersicht“, 2011-08-03, <http://e-control.at/de/recht/regulierungsrecht/tor>, letzter Aufruf: 25.07.2011
- [10] TAEV: „Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an öffentliche Versorgungsnetze mit Betriebsspannungen bis 1000 V mit Erläuterungen der einschlägigen Vorschriften“, Österreichs Energie, 2008
- [11] Elektrotechnikverordnung 2002: „Änderung der Elektrotechnikverordnung 2002/ A1 – ETV 2002/A1“, 2006
- [12] Nullungsverordnung: „Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich - Teil II“, 1998, http://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblPdf/1998_322_2/1998_322_2.pdf, Zuletzt besucht: 25.07.2011
- [13] Elektrotechnikgesetz 1992: „Bundesgesetz über Sicherheitsmaßnahmen, Normalisierung und Typisierung auf dem Gebiete der Elektrotechnik“, 1993 http://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblPdf/1993_106_0/1993_106_0.pdf, Zuletzt Besuch: 25.07.2011

- [14] E. Schmutz, R. Woschitz: „Sicherheit und Schutzmaßnahmen“ Vorlesungsunterlagen zur gleichnamigen Vorlesung am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 2010
- [15] G. Ziegler: „Digitaler Distanzschutz – Grundlagen und Anwendung“, 2. Auflage, Herausgeber: Siemens Aktiengesellschaft, Berlin und München, Verlag: Publicis Corporate Publishing, Erlangen, 2008
- [16] C. Raunig, M. Aigner, T. Haring, E. Schmutz, L. Fickert: „Intelligente Netzsysteme und die damit verbundenen neuen Anforderungen an die Schutztechnik“, Poster-Präsentation, FNN/ETG-Tutorial, Schutz- und Leittechnik, Ulm, 2010
- [17] ÖVE/ÖNORM E 8001-1 (konsolidierte Fassung einschließlich der Änderungen): „Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis ~ 1000 V und – 1500 V - Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen)“, 2010-03-01
- [18] ÖVE/ÖNORM E 8383: „Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV“, 2000-03-01
- [19] ÖVE/ÖNORM EN 50160: „Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen“, 2005-01-01
- [20] ÖVE EN 61000-3-2: „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 3-2: Grenzwerte – Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter)“ (IEC 61000-3-2:2005), 2006-12-01
- [21] ÖVE/ÖNORM E 8001-4-712: „Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V – Teil 4-712: Photovoltaische Energieerzeugungsanlagen Errichtungs- und Sicherheitsanforderungen“, 2009-12-01
- [22] ÖVE/ÖNORM E 8001-2: „Errichtung von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis ~ 1000 V und – 1500 V - Teil 2: Elektrische Betriebsmittel“, 2010-05-01
- [23] ÖVE/ÖNORM E 8001-3-41: „Errichtung von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V – Teil 3-41: Beschaffenheit, Bemessung und Verlegung von Leitungen und Kabeln – Bemessung von Leitungen und Kabeln in mechanischer und elektrischer Hinsicht“, 2005-08-01
- [24] ÖVE/ÖNORM E 8001-4-753: „Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V - Teil 4-753: Elektrische Heizanlagen mit Heizleitungen und Flächenheizelemente“, 2009-04-01
- [25] E-Control: „Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen, Teil D: Besondere technische Regeln, Hauptabschnitt D4: Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen“, 2008-04-04
- [26] E-Control: „Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen, Teil D: Besondere technische Regeln, Hauptabschnitt D2: Richtlinien zur Beurteilung von Netzurückwirkungen“, 2006-19-09
- [27] HD 637 S1: Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV, Harmonisierungsdokument, Deutsche Fassung, Mai 1999
- [28] IEC 60364-4-41: Low-voltage electrical installations – Part 4-41: Protection for safety – Protection against electric shock, 2005-12
- [29] DIN EN 61140 (VDE 0140-1): „Schutz gegen elektrischen Schlag - Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel (IEC 61140:2001+A1:2001)“, Deutsche Fassung EN 61140:2002 A1:2006, 2007-01-03

- [30] Internationaler Fachbericht (Technical Report Type 2) IEC 479-1: „Effects of currents on human beings and livestock – Part 1: General aspects“, Genève, 1994-30-09
- [31] Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: „Energiesstrategie Österreich, Maßnahmenvorschläge“, Wien, 03-2010, http://www.energiesstrategie.at/images/stories/pdf/longversion/energiesstrategie_oesterreich.pdf, Besucht am: 24.05.2011
- [32] T. Wieland: „Verhalten von Niederspannungs-Synchrongeneratoren im Fehlerfall“, Diplomarbeit, Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2011-04
- [33] J. Pasker: „Schutzkonzept und Verhalten von Wechselrichtern in Smart Grids“, Diplomarbeit, Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, voraussichtlich 2011-11
- [34] M. Aigner: „Sicherheits- und schutzrelevante Aspekte im Parallel- bzw. Inselbetrieb im Niederspannungsnetz“, laufende Dissertation, Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz
- [35] M. Aigner, E. Schmautzer: „Sicherheits- und schutzrelevante Aspekte im Parallel- bzw. Inselbetrieb im Niederspannungsnetz“, Elektrotechnik und Informationstechnik, (e&i), Springer Verlag 2011, voraussichtlich Herbst 2011
- [36] SimTech Concept: „Konzeption des SimTech Labors zur Echtzeitsimulation von elektrischen Netzen und Komponenten“, Energie der Zukunft, 1. Ausschreibung, FFG-Projektnr.: 815625, 2010-02
- [37] KRIN – Smart Emergency Grid: „Innovative dezentrale Notstromversorgungs-netze mittels Smart Metern“, 4. Ausschreibung, FFG-Projektnr.: 829954, voraussichtlich 2013-05
- [38] European Commission, Directorate-General for Energy B.2 – Electricity & Gas: „Standardization Mandate to European Standardisation Organisations (ESOs) to support European Smart Grid deployment“, 2011-01-03, <ftp://ftp.cenelec.eu/CENELEC/Smartgrid/M490.pdf>, letzter Aufruf: 18.07.2011
- [39] J. Plesch: „Grundlegende Untersuchungen zum transienten Verhalten von dezentralen Energieerzeugern im Niederspannungsnetz“, Diplomarbeit, Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2010-07
- [40] Niederspannungs-Sicherungssysteme: "DIAZED-Sicherungssystem", 2005, http://cache.automation.siemens.com/dnl/DIzMDY5AAAA_21417954_Kennl/DIAZED.pdf, letzter Aufruf: 25.07.2011

IMPRESSUM

Verfasser

Technische Universität Graz

Lothar Fickert

Inffeldgasse 18 / 1

A-8010 Graz

Tel.: +43 (0) 316 873-7551

Fax.: +43 (0) 316 873-7553

E-Mail: jasmine.kadhim@tugraz.at

Web: www.ifea.tugraz.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds

Gumpendorfer Straße 5/22

1060 Wien

office@klimafonds.gv.at

www.klimafonds.gv.at

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH