

CARL VON OSSIETZKY UNIVERSITÄT OLDENBURG
ABTEILUNG FÜR DIGITALISIERTE ENERGIESYSTEME

Literaturanalyse, Modellierung und Evaluation von Faults in Cyber-physischen Energiesystemen

Bachelorarbeit

vorgelegt von

Malte Südema

Geboren am 22.09.1993 in Leer (Ostfriesland)

Erstprüferin: Prof. Dr.-Ing. Astrid Nieße

Zweitprüfer: M.Sc. Torge Wolff

Oldenburg, den 24. April 2022

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	v
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen	7
2.1 Energienetz	7
2.2 Cyber-physische Energiesysteme	10
2.3 Simulationen	12
2.3.1 Simulationen von Cyber-physischen Systemen	13
2.3.2 Simulationen von Cyber-physischen Energiesystemen	14
2.4 Fault Detection	16
2.5 Verwendete Technologien	18
2.6 Systematische Literaturrecherche	20
3 Verwandte Arbeiten	23
3.1 Faults in Energienetzen	23
3.2 Kategorisierung von Faults	26
3.3 Modellierung von Cyber-physischen Energiesystemen	31
4 Literaturrecherche	35
4.1 Festlegung der Rahmenbedingungen	35
4.2 Durchführung	36
4.3 Ergebnis	38
4.3.1 Anmerkungen	41
5 Taxonomie der Faults	43
5.1 Festlegung der Kriterien	43
5.2 Einordnung von Faults	45

6	Anforderungen an die Simulation	49
6.1	Muss-Anforderungen	49
6.2	Soll-Anforderungen	50
7	Konzeption	53
7.1	Modellierung eines Energienetzes	54
7.2	Einbettung der Faults	56
7.3	Exportierung des Netzes	58
8	Implementierung	59
8.1	Modellierung in pandapower	59
8.2	Fault-Einbettung	60
8.3	Bereitstellung des Datensatzes	63
9	Evaluation	65
9.1	Vergleich mit anderen bekannten Datensätzen	65
10	Fazit	69
11	Ausblick	71
11.1	Literaturanalyse und Taxonomie	71
11.2	Modellierung und Bereitstellung der Faults	71
A	Anhang	73
A.1	Veränderungen des Netzes	73
A.2	Implementierung der Methode zur Zeitreihensimulation	78
A.3	Kategorisierungsbaum für Smart Grid Gefahren	79
A.4	Exemplarischer Aufbau eines Dataframes	80
A.5	Vollständige Basisliste nach der 2. Iteration	80
	Abbildungsverzeichnis	85
	Tabellenverzeichnis	87
	Literaturverzeichnis	89

Abkürzungen

ANN	Artificial Neural Network
CPES	Cyber-physisches Energiesystem
CPS	Cyber-physisches System
CSV	Comma-separated values
DDoS	Distributed Denial of Service
DER	Distributed Energy Resources
DHUE	Drehstrom-Hochspannungs-Übertragung
DSM	Demand-Side-Management
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FT	Fourier-Transformation
HGUE	Hochspannungs-Gleichstromübertragung
HLA	High Level Architecture
HMM	Hidden-Markov-Modell
HS	Hochspannung
Hz	Hertz
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
IoT	Internet of Things
MDPI	Multidisciplinary Digital Publishing Institute
ML	Maschine Learning
MS	Mittelspannung

NS	Niederspannung
OPNET	Optimized Network Engineering Tools
OS	Open Source
PRL	Primärregelung
RINSE	Real-Time Immersive Network Simulation Environment for Network Security Exercises
RTDS	Real-Time Digital Simulator
SE	Spannungsebenen
SG	Smart Grid
SRL	Sekundärregelung
SVM	Support-Vector-Machine
UENB	Übertragungsnetzbetreiber
VD	Vergleichsdatensatz
WAMPAC	Wide Area Monitoring Protection and Control
WASA	Wide Area Situational Awareness

1

Einleitung

1.1 MOTIVATION

Die Energiewirtschaft steht im Wandel von einer zentralen Energieerzeugung und unidirektionalen Energieflüssen hin zu einer dezentralen Energieerzeugung und bidirektionalen Energieflüssen. Dies resultiert aus der steigenden Anzahl kleinerer Energieerzeuger, die mit Hilfe von Photovoltaik- und Windkraftanlagen Strom aus regenerativen Energiequellen erzeugen und einspeisen. Folglich verringert sich der Bedarf an Energie aus konventionellen Kraftwerken, die primär durch konservative Energiequellen, wie fossile Brennstoffe oder Atomkraft, Strom erzeugen und einseitig in das Netz einspeisen. [1, 2] Dies führt zu einer erhöhten Komplexität innerhalb des Stromnetzes, da nun wesentlich mehr Akteure miteinander interagieren müssen und die Einspeisung des Stroms in das Energienetz eine erhöhte Volatilität durch die erneuerbaren Energien aufweist. [3] Des Weiteren steigt nicht nur der Kommunikationsaufwand zwischen den Erzeugern und den Netzbetreibern, sondern auch die Belastung auf das Energienetz selbst. Die Stromerzeugung durch erneuerbare Energiequellen, wie Sonnen- und Windenergie, ist stark von Wetterveränderungen abhängig, sodass Strom volatil ins Netz eingespeist wird. Dies führt zu einem ständigen Schwanken des Angebots und der Nachfrage. Daraus kann eine Veränderung der Netzfrequenz resultieren, sodass eine Anpassung der Energieerzeugung durch die Netzbetreiber notwendig wird.

Um den Anforderungen an das zukünftige Stromnetz in ausreichendem Maße zu genügen, müssen die physischen Systeme immer weiter mit den Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) zu einem Cyber-physisches Energiesystem (CPES) verschmelzen. [4] Die Digitalisierung als Innovationstreiber [5] hat diesen Wandel des klassischen Energienetzes hin zu einem intelligenten Netz begünstigt und bietet mit neuen Technologien, wie intelligenten Messsystemen, weitere Möglichkeiten zur Vernetzung. Die CPES bieten vielschichtige Lösungsansätze zu den Problemen mit der sich die Energiewirtschaft konfrontiert sieht. Zum einen ermöglichen CPES die Interaktion der einzelnen Akteure und zum anderen lässt sich das Netz durch die Verwendung von IKT umfangreicher beobachten, analysieren und steuern, wodurch Probleme teils automatisiert abgearbeitet werden

können. Dadurch können die Frequenz- und Spannungshaltung, das Netzengpassmanagement und der Versorgungswiederaufbau effizienter und effektiver durchgeführt werden, sodass die Systemdienstleistungen der Netzbetreiber verbessert werden können. [6] Ebenso bietet die Vernetzung die Möglichkeit das Demand-Side-Management (DSM) effektiver und automatisiert umzusetzen. DSM bezeichnet dabei die Steuerung des Strombedarfs der Verbraucher, sodass energieintensive Vorgänge auf Zeiten verlagert werden, an denen viel Energie vorhanden ist. Dadurch kann das Netz entlastet werden, wenn der Energiebedarf bereits hoch ist und Energie verbraucht wird, wenn übermäßig viel Energie durch regenerative Energiequellen vorhanden ist. [7]

Allerdings entstehen mit der erhöhten Vernetzung innerhalb eines CPES auch neue Herausforderungen, denn durch die kontinuierliche Verflechtung erhöht sich auch die Komplexität des Systems wodurch dieses anfälliger für Fehler wird. Dies bezieht sich unter anderem auf das System selbst und schließt auch Einflüsse von außerhalb ein, wie Umweltkatastrophen oder Cyber-Angriffe. Darüber hinaus ist das CPES auf die Korrektheit und Vollständigkeit der vorhandenen Daten angewiesen, um den Zustand richtig zu bewerten und die richtige Aktion durchzuführen. [8]

Da das Energienetz ein Teil der kritische Infrastruktur darstellt und laut dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik einen unmittelbaren Einfluss auf nahezu alle anderen Sektoren der kritischen Infrastruktur hat [9], ist es essenziell eine möglichst hohe Stabilität, Robustheit und Resilienz zu gewährleisten und Fehlerquellen frühzeitig zu erkennen.

Die Erkennung von Faults wird allerdings durch die hohe Vernetzung und der steigenden Komplexität innerhalb von CPES erschwert. Dabei bezeichnen Faults innerhalb eines Energienetzes jede Störung die den normalen Betrieb des Netzes beeinträchtigen. Dazu kommen bereits bekannte und erforschte Fehler im konventionellen Energienetz sowie auch neue Fehler durch die Einbindung von IKT. Auch eine größere Datengrundlage, welche durch die Einbindung von Sensoren und dem Speichern von Monitoring Daten entsteht, kann die Fault Detection erschweren, da Faults in der Masse von vorhandenen Daten untergehen können. CPES und speziell die weitere Einbindung von IKT ermöglichen jedoch ebenso neue Methodiken, um anormales Verhalten innerhalb komplexer Systeme zu erkennen. Unter anderem bieten Maschine Learning (ML)-Algorithmen die benötigten Eigenschaften, um Faults zu erkennen oder diese zu prognostizieren. [10] Durch die Vielzahl an Faults ergeben sich für die Verwendung von ML-Algorithmen verschiedene Vor- und Nachteile. Die Effektivität und Effizienz zur Erkennung spezifischer Faults kann durch eine hohe Anzahl an Algorithmen stark variieren. Dadurch können bestimmte Algorithmen für die Lösung eines Problems qualifizierter sein als andere. Um die Eignung verschiedener Algorithmen zur Fault Detection zu untersuchen ist es notwendig, über eine Übersicht

von möglichen Faults zu verfügen und diese kategorisieren zu können. Jedoch ist zum jetzigen Forschungsstand kein solcher Katalog vorhanden, wodurch die Einordnung von [ML-Algorithm](#)en, die sich besser für bestimmte Faults eignen, erschwert wird und keine übersichtliche Auflistung ermöglicht.

Zusätzlich können die Methoden nicht innerhalb realer Energiesysteme erprobt, untersucht und evaluiert werden, da dies die Funktion des Energienetzes beeinträchtigen kann oder sogar zu einem Ausfall führen könnte. Zudem sind die Daten in der Realität nicht gelabelt, wodurch die Evaluation solcher Methoden erschwert wird, da keine genaue Kenntnis über die aufgetretenen Faults besteht. Besonders für die Untersuchung verschiedener [ML-Algorithm](#)en hinsichtlich ihrer Eignung zur Fault Detection und eventueller Fehlerbehandlung ist es daher notwendig einen Testdatensatz oder eine Testumgebung zur Verfügung zu stellen, welches ein realitätsnahes Energienetz abbildet. Solch ein Modell muss jedoch einerseits ein reales Netz widerspiegeln und andererseits gezielt Faults enthalten, damit diese von den Algorithmen identifiziert werden können und so ihre Effektivität zur Fault Detection untersucht werden kann. Da bestimmte Faults in Daten aus realen Energienetzen meist nur sehr selten vorkommen, nicht vorhanden oder nicht entdeckt und gekennzeichnet sind, spielt die Implementierung von Faults in ein solches Modell eine wichtige Rolle, um verschiedene Szenarien darstellen zu können. Dadurch wird eine Untersuchung dieser Faults innerhalb eines Energiesystems meist erst ermöglicht.

Um einen möglichst optimalen Algorithmus für bestimmte Faults evaluieren zu können, ist eine vorherige Kategorisierung der Faults und ein Modell, welches Faults aus verschiedenen Kategorien enthält, hilfreich. Durch die weiteren Untersuchungen, welche durch solch ein Modell ermöglicht werden, kann die Belastbarkeit, Robustheit, Resilienz und Resistenz gegenüber Cyber-Angriffen und Umwelteinflüssen eines [CPES](#) verbessert werden, ohne dieses im Betrieb zu gefährden. Es existieren bereits eine Reihe von Testumgebungen, um genau diese Fragestellungen zu untersuchen. Allerdings sind diese entweder spezialisiert auf die Untersuchung eines speziellen Faults, adressieren andere Cyber-physische Systeme als das Energienetz oder bilden nur einen sehr spezifischen Teil des Energienetzes ab. [11] Um Algorithmen zur Fault Detection zu untersuchen, wäre es daher wichtig ein Modell zu verwenden, welches einen größeren Teil des Energienetzes abbildet, sodass auch mögliche Veränderungen in anderen Bereichen des Netzes sichtbar werden, wenn einer der implementierten Faults auftritt.

1.2 ZIELE DER ARBEIT

Durch die aus der Motivation hervorgehenden Problematiken ergeben sich zwei wesentliche Forschungsfragen, die in dieser Arbeit untersucht werden. Die Erste behandelt die fehlende

Aufzistung und Zuordnung von Faults:

Forschungsfrage 1. *Welche Faults existieren in einem Cyber-physischen Energiesystem und wie lassen sich diese in einer Taxonomie kategorisieren?*

Für die Behandlung dieser Frage wird eine systematische Literaturrecherche durchgeführt, um eine umfangreiche Liste der Faults zu erhalten, die in einem CPES auftreten können. Darauf folgt die Erstellung einer Taxonomie, um eine Kategorisierung der Faults aus den unterschiedlichen Domänen der Energietechnik und der IKT zu ermöglichen. Die zweite Forschungsfrage thematisiert die Umsetzung eines Energienetzes mit Faults:

Forschungsfrage 2. *Wie kann eine Simulation eines Energienetzes mit Faults modelliert sowie als Datensatz bereitgestellt werden und wie unterscheidet dieser sich von vergleichbaren Datensätzen?*

Hierfür werden Anforderungen erhoben und folglich ein Konzept zur Erstellung einer Simulation vorgestellt. Durch eine Implementierung des Konzeptes mit Hilfe von *panda-power* [12] und *simBench* [13] wird ein Datensatz erzeugt. Dieser wird mit vergleichbaren Datensätzen gegenüber gestellt und evaluiert.

1.3 AUFBAU DER ARBEIT

Zunächst werden in Kapitel 2 die Grundlagen für die Arbeit dargelegt. Diese beinhaltet den Aufbau einer Simulation im Allgemeinen. Zudem werden im Speziellen Simulationen, die ein Cyber-physisches System (CPS) und CPES modellieren, beschrieben und auch verschiedene Fault Detection Methodiken werden betrachtet. Außerdem werden die in dieser Arbeit verwendeten Technologien vorgestellt und die grundlegende Vorgehensweise einer systematischen Literaturrecherche aufgezeigt, welche in dieser Arbeit durchgeführt wird. Das Kapitel 3 zeigt die Einordnung dieser Arbeit zum aktuellen Forschungsstand. Dabei stehen verwandte Arbeiten im Vordergrund, die zur Beantwortung der in Abschnitt 1.2 formulierten Forschungsfragen beitragen oder diese durch eine andere Herangehensweise beantworten können.

Zur Bearbeitung der Forschungsfrage 1 wird im Folgenden Kapitel 4 eine Literaturrecherche, nach dem in Abschnitt 2.6 vorgestellten Vorgehen, durchgeführt. Dabei werden die Zwischenschritte erläutert und als Ergebnis eine möglichst umfangreiche Liste an Faults in Energienetzen erarbeitet. Das Ergebnis der Literaturrecherche wird in Kapitel 5 verwendet, um anhand der gefundenen Faults Eigenschaften zu extrahieren, welche als Kategorien für die Taxonomie dienen können. Abschließend werden exemplarisch Faults kategorisiert, um die Funktionalität der Taxonomie darzustellen.

Um die [Forschungsfrage 2](#) zu beantworten werden zunächst in [Kapitel 6](#) Soll- und Muss-Anforderungen erhoben, die die Funktionalität der Simulation beschreiben. Die Anforderungen resultieren aus den für die Beantwortung nützlichen Eigenschaften, die das System bieten muss, wie auch aus den in der Literaturanalyse gefundenen Faults und den in der Kategorisierung erarbeiteten Eigenschaften. Dadurch wird auch die Reihenfolge der Bearbeitung der Forschungsfragen begründet, denn ohne die vorherige Bearbeitung der [Forschungsfrage 1](#) kann die [Forschungsfrage 2](#) nicht sinnvoll untersucht werden. Die Anforderungen dienen zudem der Eingrenzung sowie auch als Zielsetzung des erstellten Systems. Die darauf folgende Konzeption in [Kapitel 7](#) des Systems baut dabei im wesentlichen auf die Erfüllung der Anforderungen auf. Dabei wird ebenso festgelegt, wie die Simulation strukturell aufgebaut ist, die Faults eingebettet werden sollen und welche Daten der abschließende Datensatz enthalten soll. Die Implementierung wird in [Kapitel 8](#) beschrieben und umfasst die Umsetzung der Anforderungen des Konzeptes mit Hilfe der Simulationsumgebung *pandapower* [12] und *simBench* [13]. Abschließend wird die Simulation evaluiert, indem sie in [Kapitel 9](#) mit ähnlichen Datensätzen verglichen wird und Unterschiede herausgestellt werden.

[Kapitel 10](#) stellt das vorletzte Kapitel der Arbeit dar und zieht ein objektives Resümee, ob die Forschungsfragen durch die Arbeit beantwortet werden konnten. Außerdem wird Kritik an der Erarbeitung vorgenommen, sodass positive wie auch negative Aspekte der Arbeit dargestellt werden. In [Kapitel 11](#) wird abschließend ein Ausblick gegeben, wie das System weiterentwickelt werden könnte. Dazu zählen auch Vorschläge für die Erweiterung der Einbettung von Faults in der Simulation, wie auch eine Möglichkeit die im Datensatz enthaltenen Daten mit mehr Informationen zu versehen.

2 | Grundlagen

In diesem Kapitel werden die zur Verständnis der vorliegenden Arbeit benötigten Grundlagen vorgestellt. Die Grundlagen umfassen einen Überblick über die Funktionsweise von Energienetzen, welche in [Abschnitt 2.1](#) beschrieben werden, sowie die Abgrenzung und die Eigenschaften von CPES, die im [Abschnitt 2.2](#) näher erläutert werden. Zudem werden die Eigenschaften einer Simulation im Allgemeinen in [Abschnitt 2.3](#) aufgezeigt und in [Unterabschnitt 2.3.1](#) sowie in [Unterabschnitt 2.3.2](#) werden die Simulation von CPS respektive CPES im Speziellen eingehender beleuchtet. In [Abschnitt 2.4](#) werden Methoden zur Fault Detection dargelegt. Abschließend werden die verwendeten Technologien in [Abschnitt 2.5](#) vorgestellt und die Vorgehensweise der Literaturanalyse in [Abschnitt 2.6](#) erläutert.

2.1 ENERGIENETZ

Als Energienetz wird die Übertragung und Verteilung von Strom über elektrische Leitungen bezeichnet. Außerdem werden durch den Begriff weitere Komponenten, wie Transformatoren oder Umspannwerke, die zur Distribution beitragen, abgedeckt. Das deutsche Stromnetz wird dabei in vier unterschiedliche Spannungsebenen (SE) aufgeteilt. Die SE unterscheiden sich durch die Spannung mit der die Energie durch die Leitungen fließt und den Anwendungsbereichen, wie in [Abbildung 2.1](#) dargestellt.

Die Höchstspannungsebene wird auch als das Übertragungsnetz bezeichnet und dient vorrangig zur Übertragung von elektrischer Energie über weite Strecken und zur Anbindung des deutschen Netzes an das europäische Verbundnetz. Die Übertragungsnetzbetreiber (UENB) sind für diese SE zuständig und haben zudem die Aufgabe der Frequenzhaltung. Die für das gesamte Verbundnetz gültige Netzfrequenz von 50 Hertz (Hz) kann durch Stromentnahme oder Stromzufuhr schwanken, sodass diese nicht mehr im Unempfindlichkeitsbereich, also in dem Bereich zwischen 49,9 Hz und 50,01 Hz, liegt. Tritt eine Über- oder Unterfrequenz auf, dient die Primärregelleistung (PRL) zunächst zur Abfederung der Ungleichheit. Sie muss diese dabei innerhalb von 30 Sekunden ausgleichen und 15 Minuten halten können. Dieser Mechanismus wird direkt anhand der Netzfrequenz ausgelöst, damit kein Zeitverlust durch Kommunikation zwischen den UENB entsteht. Nach fünf Minuten der Lastensteuerung durch die PRL wird diese in der Regel von der Sekundärregelleistung (SRL) abgelöst. Diese

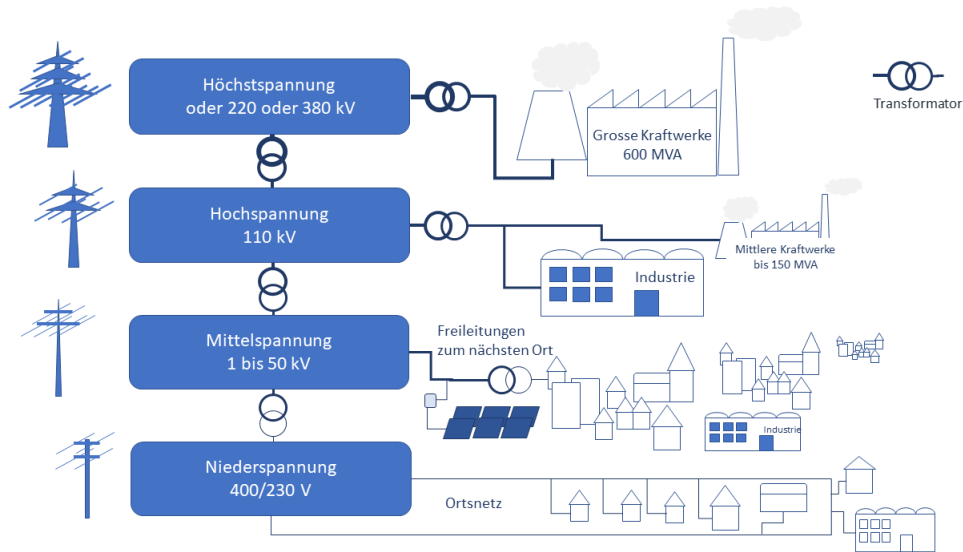


Abbildung 2.1: Abbildung der Netzebenen mit Erzeugern und Verbrauchern [14].

wird durch die **UENB** koordiniert und steht nicht, wie die **PRL**, in direkter Abhängigkeit mit dem europäischen Verbundnetz. Dabei werden in der **PRL** und **SRL** zur Kompensation der Frequenzungleichheit moderne Kernkraftwerke, Gas-und-Dampf-Kraftwerke und Pumpenspeicherwerke verwendet, aber auch dezentrale Energieerzeuger, wie Wind- und Solarparks, können zusammengefasst als virtuelles Kraftwerk dazu beitragen. Kann die Frequenz 15 Minuten nach dem Einsetzen der **SRL** immer noch nicht gewährleistet werden, setzt die Minutenreserve ein, welche nach der selben Systematik wie die **SRL** funktioniert. [16] Die **Abbildung 2.2** stellt diesen Prozess grafisch dar. Die elektrische Energie wird über Freileitungen in der Regel durch die Drehstrom-Hochspannungs-Übertragung (**DHUE**), also mit Hilfe von Wechselstrom, transportiert und mit dem europäischen Verbundnetz verbunden. Bei sehr weiten Strecken, wie bei Unterseekabelverbindungen oder Anbindungen von Offshore-Windparks, wird auf dieser **SE** auch Strom durch die Hochspannung-Gleichstromübertragung (**HGUE**) transportiert, da diese kleinere Spannungsabfälle und weniger Übertragungsverluste aufweist. Zudem können, durch die Verwendung von Gleichstrom, Netze mit verschiedenen Frequenzen miteinander verbunden werden. Letzteres ist bei der **DHUE** nicht ohne Weiteres möglich. Nichts desto trotz wird im allgemeinen die **DHUE** verwendet, da durch Wechselstrom die Spannungen flexible durch Transformatoren verringert oder erhöht werden können, um die Spannung der elektrische Energie auf den verschiedenen **SE** weiter transportieren zu können. [17]

Ähnlich wie die Höchstspannungsebene kann auch die Ebene der Hochspannung (**HS**) als Verbindungspunkt zu dem europäischen Verbundnetz dienen und als Übertragungsnetz

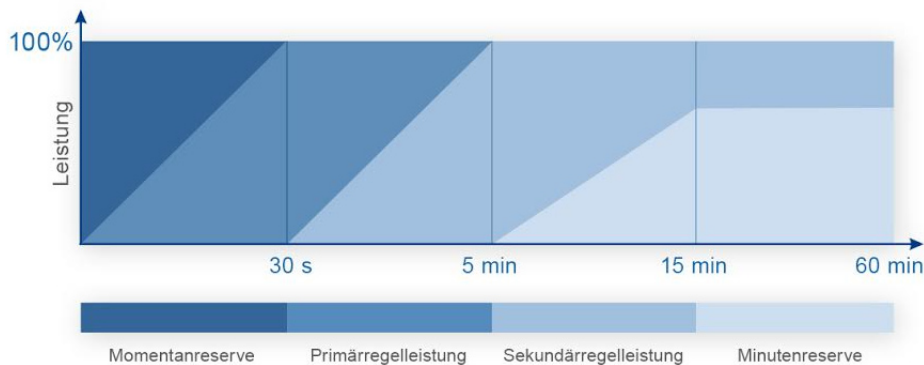


Abbildung 2.2: Abbildung der Regelleistung [15].

betrachtet werden. Dabei wird diese Ebene meist durch die Höchstspannungsebene mit Hilfe von Umspannwerken gespeist und über Freileitungen übertragen. Allerdings übernimmt diese Ebene bereits Verteilungsaufgaben, um beispielsweise Stadtwerke oder Industrien mit sehr hohem Energieverbrauch ausreichend mit Energie zu versorgen. [18, 19]

Die darunterliegende SE ist die Mittelspannung (MS). Dieses ist meist Teil städtischer Verteilnetze und verteilt die elektrische Energie durch dreiphasige Erdkabel im Stadtgebiet. Dabei werden die Erdkabel zumeist in Ringleitung verlegt, wodurch eine höhere Ausfallsicherheit gewährleistet werden kann, da der in der Regel von zwei Seiten Strom an den Zielort gelangen kann. Weiterer Anwendungsbereich ist die Bahn, die mit einphasigen Stromleitungen die Energie für Elektrozüge bereitstellt. Auf der Ebene der MS werden zudem Signale zur Rundsteuerung an das darunterliegende Netz weitergeleitet. [17] Die Rundsteuerung bezeichnet dabei Signale, welche zur Lastensteuerung beitragen, wie Zu- und Abschaltung von zuschaltbaren Lasten oder auch Elektrospeicherheizungen und Elektrowärmepumpen. Ebenfalls wird die Einspeisung von dezentralen Energieerzeugern reguliert, Stromzähler auf den aktuellen Strompreis aktualisiert und auch Blindleistung zur Frequenzhaltung erzeugt. [20]

Die Ebene der Niederspannung (NS) ist, wie auch die MS-Ebene, Teil des Verteilnetzes und wird ebenso von Energieversorgungsunternehmen (EVU) betrieben und verwaltet. Diese Ebene ist für die Endversorgung der Verbraucher, wie Haushalte und kleinere Betriebe, verantwortlich und wird meist durch vierphasige Leitungen geleitet, um auch eine Anbindung von einphasigen Verbrauchern zu ermöglichen. Je nach Standort des Netzes werden verschiedene Netztopologien und Übertragungstechniken verwendet. So stehen im ländlichen Raum noch Freileitungen und Erdkabel in Konkurrenz miteinander und werden oft in einem Strahlennetz an die Endverbraucher geleitet. Aber desto städtischer die Um-

gebung beziehungsweise je mehr Strom benötigt wird, werden Erdkabel bevorzugt. Auch die Topologie verändert sich, sodass eher eine Ringverteilungsnetz sowie eine Maschennetz vorliegt. [21, 17]

2.2 CYBER-PHYSISCHE ENERGIESYSTEME

Aufgrund der sich verändernden Rahmenbedingungen und Anforderungen an das Energienetz durch neue Einflüsse, wie erneuerbare Energien, ist eine Transformation zu einem intelligenten Netz, auch „Smart Grid (SG)“ genannt, nötig. [22] Laut dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft ist ein SG ein intelligentes Energienetz, welches das Verbrauchs- und Einspeiseverhalten aller Marktteilnehmer, die mit ihm verbunden sind, integriert. Zudem sichert es ein ökonomisch effizientes, nachhaltiges Versorgungssystem mit niedrigen Verlusten und hoher Verfügbarkeit. [23] Der Begriff des SG umfasst somit viele Teile der Energiedomäne. Es wird insbesondere die Interaktion zwischen den einzelnen Marktteilnehmern herausgestellt. Diese umfassen nicht nur die regulierten Netzbereiche, sondern auch den wettbewerblich orientierten Marktbereich. [24] Des Weiteren enthält die Definition verschiedene Eigenschaften, welche das Netz wie auch andere Aspekte betreffen, wie Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit. Daraus lassen sich weitere Eigenschaften ableiten, die ein SG beinhaltet, wie Verlässlichkeit, Effizienz, Resistenz gegenüber Cyber- und Physischen-Attacken, Resilienz, Verbraucherfreundlichkeit, die Möglichkeit neue Technologien bezüglich Erzeugung und Speicherung einzubinden, Auslastungsoptimierung und die Fähigkeit sich selbstständig von Fehlern zu erholen. [25, 26]

Die Eigenschaften eines SG ergeben Anforderungen, welche innerhalb eines vernetzten Energienetzes umgesetzt werden müssen. Diese Anforderungen sind die Restrukturierungsfähigkeit, welches die transparente Intergration, Segregation und Substitution von Systemkomponenten beschreibt, Security bezüglich Datenschutz und Sicherung der Datenintegrität, Relokation von Funktionalität, Rück- und Vorwärtskompatibilität über längere Zeiträume, Skalierbarkeit hinsichtlich der Integration einer Vielzahl von Erzeugern und Verbrauchern, Integrierbarkeit von bestehenden Systemen, Safety im Sinne der Robustheit, Zuverlässigkeit, Vermeidung von Single-Points-of-Failure und Echtzeitfähigkeit.

Um diese Anforderungen erfüllen zu können verschmelzen die IKT und das Energienetz immer weiter zu einem komplexen CPES. [29] Im Gegensatz zu einem SG, welches vielerlei Bereiche der Energiedomäne anspricht, begrenzt sich ein CPES auf die Verbindung zwischen physischen Komponenten und IKT. So wird der Begriff des CPES definiert als die Verbindung zwischen den physischen Komponenten sowie informatischen und softwaretechnischen Komponenten durch einen Datenaustausch in Echtzeit innerhalb eines Energienetzes. [2] [Abbildung 2.3](#) zeigt, dass Stromleitungen, Transformatoren, Sensoren und andere Kompo-

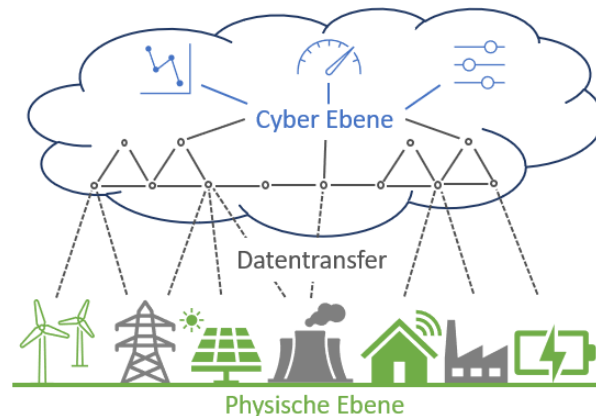


Abbildung 2.3: Beziehung der physischen Komponenten und der IKT in einem CPES (nach [27, 28]).

nenten der Netzinfrastruktur mit intelligenten Messsystemen die physische Komponente des Systems abbilden. Die informatischen und softwaretechnischen Komponenten bilden den anderen Bereich des CPES und verarbeiten die großen Datenmengen, die durch eine Dateninfrastruktur, wie das Internet oder lokale Netzwerke, zur Verfügung stehen, um das Energiesystem zu überwachen, analysieren und mit den physischen Komponenten zu interagieren. [27] Um ein funktionierendes CPES zu gewährleisten, muss es einige Eigenschaften erfüllen. Durch dessen Größe und Komplexität muss die Verlässlichkeit und Sicherheit gegeben sein. Zudem muss es robust und resilient gegenüber Fehlern und Umweltveränderungen sein und unerwartete Zustände selbständig durch automatische Handlungsabfolgen lösen können. Des Weiteren werden die Komponenten eng in das System integriert und kommunizieren in Echtzeit über verschiedene Kommunikationssysteme miteinander, wobei jede Komponente fähig zur Einbettung in das System sein muss. CPES besitzen ferner eine hohe zeitliche und räumliche Komplexität, da die einzelnen Komponenten und Subsysteme weit verteilt sind und ihre Aufgaben in vorgesehenen Zeiträumen erfüllen müssen. [29] Mit Hilfe von CPES können einige oben genannte Herausforderungen bewältigt werden, aber es werden auch neue Problematiken aufgeworfen. Die zunehmende Komplexität, die unter anderem durch die Integration von weiteren Komponenten entsteht, erhöht die Anzahl potentieller Fehlerquellen. Mit der Erhöhung der Komponenten steigt auch die Verflechtung dieser mit anderen Systemen innerhalb des CPES, wodurch das Risiko einer durch Fehler verursachte Kaskade von Fehlfunktionen erhöht wird. Ferner steigt ebenso die zu verarbeitende Datenmenge rasant an und es kann zu Engpässen bei der Übertragung und Verarbeitung der Daten kommen. [30] Zudem entsteht ein Sicherheitsrisiko durch den Datenaustausch zwischen den Komponenten, wodurch Denial of Service-Attacks, Bad Data

Injection oder andere Arten von Cyber-Angriffen auf die Datenkanäle ermöglicht werden. Konservative Energienetze kommunizieren meist vollständig abgeschlossen in ihrem eigenen System und sind so nahezu immun gegenüber Cyber-Angriffen. Bei CPES stellt die Kommunikation über verschiedene Dateninfrastrukturen hingegen einen Kernaspekt dar, wodurch die Vorteile neuer Technologien erst nutzbar werden. [31] Die bereits hohe Komplexität, welche sich mit dem Ausbau des Netzes, der Implementierung und Erweiterung der Funktionalitäten und der steigenden Anzahl an Komponenten nochmals vergrößert, wird es anfälliger für Fehler und bietet eine größere Angriffsfläche für Angriffe. [31] Außerdem können diverse Fehler innerhalb des CPES auftreten, welche sich ebenso in unterschiedlichen Komponenten lokalisieren lassen und durch verschiedenen Einflüsse ausgelöst werden können. [32]

2.3 SIMULATIONEN

Als Simulation wird eine Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell bezeichnet, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Simulationen werden häufig verwendet, wenn das zu untersuchende System sich in der Realität zu langsam oder zu schnell verhält, ein Experiment zu gefährlich ist oder die Erprobung in der Realität zu hohen Kosten führen würde. Im Gegensatz zu anderen Methoden ist es durch Simulationen möglich Systeme durch eine entsprechende Modellierung abzubilden und komplexe Systematiken handhabbar zu machen sowie das Zusammenspiel einzelner Systemvariablen aufzuzeigen. [33]

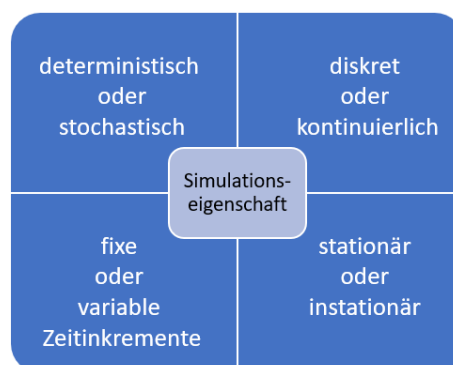


Abbildung 2.4: Eigenschaften einer Simulation (nach [34]).

Die simulierten Modelle können durch einige Charakteristiken, wie in [Abbildung 2.4](#) dargestellt, klassifiziert werden. Unterschieden werden können sie dabei, ob sie deterministisch oder stochastisch sind. Diese Eigenschaften stellen dabei dar, wie sich die Zustände in der

Simulation verändern. Wenn die Chance auf eine Veränderung des Zustands auf Wahrscheinlichkeiten basiert, wird ein stochastisches Modell verwendet. Ebenso kann festgestellt werden, ob die Variablen und Zustände innerhalb eines Modells diskret oder kontinuierlicher Natur sind. Weiter können sie anhand ihrer Zeitinkremente klassifiziert werden. Hier wird zwischen fixen Intervallen und frei wählbaren, also variablen Intervallen, unterschieden. Letztlich können Modelle entweder stationär oder nicht stationär sein. Als stationär wird ein Modell bezeichnet, wenn das Modell, meist durch eine vorherige Einschwingphase, einen stabilen Zustand annimmt und einen unendlichen Zeithorizont hat. Dahingegen kommt es bei nicht stationären Modellen zu einem Ende, welches oftmals durch Strukturbrüche während der Simulation hervorgerufen wird. [34]

Für die Implementierung von Simulationen stehen viele Möglichkeiten zur Verfügung. Diese lassen sich beispielsweise direkt mit Hilfe von allgemeinen Programmiersprachen und dafür verfügbaren Bibliotheken implementieren. Ebenfalls können auch speziell für die Modellierung von Simulationen entworfene Programmiersprachen wie *Simscrip*t [35], *GPSS* [36], *CSIM* [37], *SIMULA* [38] oder *CSL* [39] verwendet werden. Außerdem bieten Simulationsumgebungen mit graphischer Oberfläche wie *Plant Simulation* [40], *SimScale* [41] oder *Enterprise Dynamics* [42] eine weitere Möglichkeit Simulationen zu modellieren und umzusetzen.

2.3.1 Simulationen von Cyber-physischen Systemen

Die in [Abschnitt 2.3](#) benannten Vorteile spielen bei der Simulation von **CPS** eine elementare Rolle. Die komplexe Struktur und die Größe solcher Systeme macht eine Erprobung in Feldversuchen an Realsystemen oft schwierig und teuer. Zudem entstehen durch die Vernetzung von **IKT** mit vorhandenen Infrastrukturen zunehmend neue **CPS** in verschiedenen Umgebungen, wie der Medizin, Produktion, Automobilen und innerhalb kritischer Infrastrukturen. Um die Stabilität solcher Systeme nicht zu gefährden können Simulationen verwendet werden, um Fragestellungen und neue Methodiken innerhalb des Systems zu untersuchen. Die Simulation von **CPS** spielt in vielen Bereichen eine wichtige Rolle. So sind Simulationen von Produktionsstätten nicht nur zur Planung neuer Fabriken hilfreich, um die Kapazitäten abzuschätzen und Produktionsabläufe zu testen, sondern helfen auch bei der Verbesserung von Fabriken, die bereits in Betrieb sind. Dadurch können beispielsweise Veränderungen von zeitlichen Abläufen erprobt werden sowie die Verwendung neuer Technologien ohne dadurch Verluste der Produktivität in Kauf zu nehmen. Bei der Simulation von Fabriken können verschiedene Produktionsabläufe modelliert werden bis hin zu einer Modellierung des gesamten Produktionsstätte zu einem digitalen Zwilling. [43] Ein weiteres Beispiel für einen digitalen Zwilling eines **CPS** ist die Modellierung von Batte-

riesystemen innerhalb bestimmter Umgebungen. Dadurch kann der aktuelle Zustand der Batterie besser bestimmt und Fehlfunktionen frühzeitig erkannt werden. [44] Bei digitalen Zwillingen handelt es sich allerdings nicht nur um eine Simulation, viel mehr sind diese als Simulation von Simulationen zu verstehen. [45] Auch in der Medizin bilden sich CPS durch die zunehmende Vernetzung, zwecks Diagnostik, der Überwachung der Patienten und der Unterstützung des Personals. Letzteres kann durch Systeme unterstützt werden, die anhand von Daten bei Entscheidungsfindung weiterer Behandlungsmethodiken helfen können. Um diese Systeme zu verbessern wurde eine Simulation implementiert, welche selbständig Ereignissequenzen anstößt und zur Laufzeit Variablen ändert, um die Reaktion des Systems zu untersuchen und zu verbessern. [46] Es können hingegen aber auch weiter verteilte CPS modelliert werden, wie miteinander kooperierende Fabrikanlagen, um beispielsweise die Produktivität einer gesamten Produktionskette zu erhöhen. Das betrachtete CPS ist in solchen Fällen abstrakter und spiegelt oft nur relevante Komponenten wieder. Deshalb wurde in der Stahlproduktion in der Arbeit von Iannino et al. [47] das Zusammenspiel zwischen den Fabrikstandorten simuliert, da die einzelnen Fabriken für sich genommen keine weiteren Optimierungspotenziale mehr geboten haben. Hierfür wurden die einzelnen Standorte als System mit Hilfe der Objektorientierten Programmiersprache C# modelliert, um verschiedene Möglichkeiten der Prozessoptimierung zu evaluieren und evolutionäre Algorithmen zur Zeitplanung zu erproben. Einige Bereiche der kritischen Infrastruktur bilden ein CPS, das sehr viele Komponenten integriert und über einen großen Raum verteilt ist. Um die Funktionsweise eines CPS innerhalb der Wasserwirtschaft zu untersuchen, wurde dieses mit Hilfe von *EpaNet* [48] modelliert. Hierbei wurde die Topologie des Wasserverteilungsnetzes nachgestellt. Durch Knoten wurden unter anderem Kläranlagen und Verbraucher dargestellt und mittels Kanten wurden die Wasserleitungen abgebildet. Anhand dieses Modells konnten die Auswirkungen von verschiedenen Ereignissen, wie Wasserverunreinigungen und Ausfall von Pumpen, simuliert werden. [49] Hierbei sind Simulationen besonders wertvoll, da solche Ereignisse in der Realität innerhalb von kritischen Infrastrukturen selten auftreten und eine Fehlerbehandlung schwierig zu testen ist. [50]

2.3.2 Simulationen von Cyber-physischen Energiesystemen

Viele Aspekte der Simulation von CPS überschneiden sich mit denen der Simulation von CPES, wobei letztere diese um Eigenschaften des Energienetzes erweitert. Strukturell ähnelt die Simulation eines CPES der in [Unterabschnitt 2.3.1](#) genannten Wasserwirtschaft. Im Allgemeinen liegt meist ein weit verteiltes Netz aus Knoten und Kanten vor. Bei näherer Betrachtung können aber auch Simulationen entstehen und verwendet werden,

die eine andere Struktur aufweisen, welche die Betrachtung spezieller Forschungsfragen ermöglichen. Durch die Komplexität eines CPES sind unterschiedliche Testumgebungen entstanden. [11] Neben den in Abschnitt 2.3 erwähnten Möglichkeiten allgemein Simulationen zu erstellen und Modelle zu implementieren, existieren eine Reihe von Simulatoren die speziell für die Modellierung von Energienetzen erdacht worden sind. [51] Eine bekannte Plattform stellt die Simulationsumgebung *PowerFactory* [52] dar. *PowerFactory* bietet in der Basisversion die Möglichkeit alle Netzmodelle und Betriebsmittel darzustellen. Zudem lassen sich Kurzschlüsse und Lastflüsse berechnen, analysieren und Ergebnisdaten exportieren. Unter anderem lassen sich Übertragungs- und Verteilnetzwerkzeuge oder Ausfall- und Zuverlässigkeitsanalysen als Zusatzfunktionen hinzubuchen. Die Simulationsumgebung *OPAL-RT* [53] ermöglicht die Simulation verschiedener Domänen, wie der Luft- und Raumfahrt, Leistungselektronik, Automotive oder eben auch Energienetze. Für die Abbildung eines Energienetzes in Echtzeit bietet *OPAL-RT* umfangreiche Werkzeuge. Stromerzeugung, Regelung von Stromnetzen und die Umsetzung von Mikronetzen werden innerhalb der Simulationsumgebung ermöglicht sowie die Implementierung von Schutzsystemen. Außerdem bietet es Möglichkeiten neue Ansätze, wie der Gebrauch von modularen Multilevel-Konvertern und Wide Area Monitoring Protection and Control (**WAMPAC**), zu verwenden. Ähnlichen Funktionalitäten bieten weitere kommerzielle Umgebungen, wie *Real-Time Digital Simulator (RTDS)* [54] und *PowerWorld* [55]. *RTDS* bietet zudem die Möglichkeit Cyber-Ebene zu modellieren. Im Gegensatz zu diesen kostenpflichtigen und proprietären Simulationsumgebungen ist *OpenDSS* [56] ein kostenfreies Open Source (OS)-Project des Electric Power Research Institute. *OpenDSS* wurde speziell im Hinblick auf die Verwendung verteilter Energieressourcen, wie Photovoltaik- oder Windanlagen, entwickelt. Ebenfalls lassen sich Energiespeicher, Mikronetze, smarte Wechselrichter und Demand Response als Simulation neben den klassischen Elementen eines Energienetzes umsetzen. Zudem bietet *OpenDSS* zahlreiche Analysemethoden, wie etwa die Durchführung von Fault Analysen und harmonische Analysen. Alternativ zu *OpenDSS* ist *GridLAB-D* [57] zu nennen, da sich der Funktionsumfang beider Umgebungen gleicht. Oftmals können die auf das Energienetz spezialisierte Simulationsumgebungen jedoch nur genau eben dieses abbilden und ermöglichen es nicht auch die anderen Teile des CPES zu simulieren. Daher kann es notwendig sein eine Co-Simulation mit anderen Simulationsumgebungen zu erstellen. Durch die Verwendung von Simulatoren, welche die Umsetzung von Netzwerken ermöglichen, wie *Real-Time Immersive Network Simulation Environment for Network Security Exercises (RINSE)* [58] und *Optimized Network Engineering Tools (OPNET)* [59], können meist erst komplexe Interaktionen zwischen dem Netz, der physischen Ebene, und der IKT-Ebene ermöglicht werden. [60]

2.4 FAULT DETECTION

Fehler und Störungen stellen in vielen Anwendungsfällen der Ingenieurwissenschaften ein Problem dar. Dabei stehen die Erkennung, Behandlung und Prognose im Vordergrund. Deshalb steht auch die Fault Detection im Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen. Besonders in sicherheitskritischen Systemen, wie in Fahrzeugen, in der Luft- und Raumfahrt, Kraftwerken, oder der Chemieindustrie, ist eine schnelle Reaktion auf Fehler oder Störungen innerhalb des Systems essentiell, um wirtschaftliche Schäden und Sicherheitsrisiken für Personen sowie Umwelt zu minimieren. [61] Die Bestandteile der kritischen Infrastruktur, wie Wasserversorgung, Verkehr sowie auch die Energieversorgung, stellen systemrelevante und -kritische Bereiche dar. Die Stabilität und Funktionalität ist essentiell für das öffentliche Leben und die Wirtschaft. Ein Ausfall der Energieversorgung führt bereits in kleineren Einzugsgebieten zu erheblichen Folgen für die Wirtschaft und Sicherheit von Personen. Durch einen Stromausfall können beispielsweise verderbliche Waren nicht gekühlt werden, Verkehrsleitsysteme, wie Ampeln, ausfallen oder Aufzüge stecken bleiben. Unterschiedliche Faktoren können dazu führen, dass das Stromnetz beeinträchtigt wird oder ausfällt. Dabei kann es durch äußere Einwirkungen, zum Beispiel Naturkatastrophen oder Terrorismus, zu physischen Beschädigungen am Netz kommen, durch menschliches Versagen Fehler verursacht werden oder durch Fehler in der IKT die Stabilität beeinträchtigt werden. [62]

Da keine Fehlerfreiheit eines Energienetzes gewährleistet werden kann, ist es von besonderer Relevanz Fehler schnell zu erkennen oder vorhersagen zu können. Aufgrund der Fehleranfälligkeit des Energienetzes werden bereits zur Planung Methoden zum Netzschutz berücksichtigt, wie beispielsweise das (n-1)-Kriterium. Transformatoren, Leitungen oder Generatoren und andere Betriebsmittel sollen demnach Redundant zur Verfügung stehen, falls eine Komponente ausfällt. Zudem kommen verschiedene Prinzipien wie der Überspannungs-, Distanz-, Vergleichsschutz und die Erdschlussmeldung zum Einsatz. So können durch Primär- und Sekundärrelais bei Überspannung des Netzes dieses vor weiteren Beschädigungen geschützt werden oder es können Schmelzsicherungen auslösen. In solch einem Fall werden die betroffenen Betriebsmittel zumeist isoliert und Maßnahmen ergriffen, um deren Ausfall zu kompensieren. [21] Die klassischen Maßnahmen Fehler zu erkennen und Betriebsmittel zu schützen führen jedoch nicht immer zu einer optimalen Behandlung der Fehler durch eine schnelle Lokalisation und Bestimmung. [63]

Durch die fortschreitende Verwendung von IKT innerhalb des Energienetzes, wodurch eine Transformation vom klassischen Energienetz zu einem CPES angestoßen worden ist, entstehen neue Möglichkeiten Faults zu erkennen. Ein Fault innerhalb eines Stromnetzes bezeichnet jede Störung, die den normalen Betrieb des Netzes beeinträchtigt. [64] Die Erkennung von Faults kann durch die Verwendung von neuen Technologien verbessert

werden. Ebenso bieten neue Fault Detection Methoden die Möglichkeit zukünftige Fehler zu prognostizieren, indem mehr Daten der Komponenten bereit gestellt werden können, wie beispielsweise Daten zum Verschleiß von Betriebsmitteln. Dies kann durch die Implementierung von Smart Devices und Sensoren in die vorhandene Netzinfrastruktur geschehen. Mit dessen Unterstützung können die Zustände einzelner Komponenten wesentlich besser überwacht und analysiert werden. Daneben können durch eine schnelle Datenübertragung Fehler präziser in der Netztopologie lokalisiert werden und eine breitere Datenerfassung kann zur Analyse verwendet werden, um spätere Faults besser zu behandeln. [65, 66] Die Sensoren überwachen nicht nur für das Energienetz typische Variablen, wie Indikatoren zu Spannungsqualität, sondern auch Umweltvariablen, die unter anderem durch Wetterstationen, Feuchtigkeitssensoren und Anemometern erhoben werden, um weitere Informationen über ein Kommunikationsmedium zu liefern.

Die breitere Datenlage und Verfügbarkeit haben zur Untersuchung von neuen Methoden der Fault Detection in Energiesystemen geführt. Durch die Komplexität des Netzes und die damit zugrunde liegenden Möglichkeiten, dass an jeder Stelle des Netzes ein Fault auftreten kann, sind die Fault Detection Methoden zumeist auf die einzelnen Unterbereiche zugeschnitten. Diese können in Übertragungs- und Verteilnetze, Industrie- und Privatverbraucher und verteilte Energiequellen aufgeteilt werden. Neben der kontextuellen Unterscheidung von Fault Detection Methoden können diese auch methodisch unterschieden werden. [67]

Eine der Methoden ist Impedanz-basiert, bei dieser wird die Entfernung zum Fehler durch Spannungen und Ströme bestimmt. Diese Methode wird im traditionellen Energienetz angewandt und stellt seit mehr als 30 Jahren Gegenstand von Untersuchungen dar. Allerdings ist sie nicht sehr genau, da mehrere Fehlerpunkte im Netz an der gegebenen Distanz vorhanden sein können. Durch Chakraborty und Das wurden aus diesem Grund in ihrer Arbeit [68] zusätzliche Daten und Messwerte von Smart Metern herangezogen und mit Hilfe des Even Harmonic Disturbance Indexes Überspannungswellen identifiziert. Durch die Profilierung von Spannung-Strom-Kennlinien können Fehler durch Vergleich zu sich normal verhaltenden Profilen erkannt werden. Dadurch kann die fehlerhafte Phase und infolge dessen die Position des Relais, wie durch Wang et al. [69] vorgestellt worden ist, bestimmt werden. Generische Verfahren werden hingegen bei der Verwendung von analytischen Methoden zur Fehlerlokalisierung benutzt. Dabei werden die betrachteten Teile des Netzes zu einem mathematischen Modell abstrahiert. Oft werden in dieser Methode der Fault Detection allgemeine Schätzverfahren für die bestimmten Erkennungsprozesse auf das Modell angewandt. Die Qualität der Fault Detection hängt dabei im Wesentlichen von dem verwendeten Algorithmus und der vorhandenen Datenmenge und -qualität ab. Durch eine Wavelet-Analyse, die auf der Fourier-Transformation (FT) basiert, können zu-

nächst normale Muster erkannt werden und im Umkehrschluss fehlerhafte Muster in der gegebenen Simulation gefunden werden. [70, 71] Ebenso werden andere Arten, welche die FT als Ausgangspunkt haben, wie beispielsweise schnelle FT oder diskrete FT, untersucht. Auch Methoden basierend auf Korrelationen, um Muster zu erkennen, fallen ebenfalls in diese Kategorie. Durch die Anwendung eines Markov-Netzwerkes haben He und Zhang [72] physikalische Parameter des Energienetzes dargestellt und durch eine Korrelationsmatrix Faults bestimmt.

Zuletzt sind Learning-basierte Methoden zu nennen. Dabei handelt es sich um Algorithmen, die selbstständig lernen. Die durch Fault Detection aufgeworfene Probleme basieren meist auf der Schwierigkeit Faults von normalem Verhalten zu unterscheiden, also der Klassifizierung dieser. Um diese Problematik zu lösen wurden verschiedene ML-Ansätze untersucht. Neben dem Hidden-Markov-Modell (HMM), um Daten zu klassifizieren, finden auch andere ML-Algorithmen des nicht überwachten Lernens (unsupervised-learning) Anwendung in der Fault Detection. Jiang et al. [73] konnten dabei mit ihren auf HMM basierendem Ansatz eine Fault Detection unter optimalen Umständen von bis zu 100 % erzielen und diese zu 92,4 % richtig identifizieren. Vergleichbare Algorithmen, basierend auf Artificial Neural Network (ANN), erzielten eine Genauigkeit bei der Detektion von 94,2 % und eine Support-Vector-Machine (SVM)-Implementierung von 95,6 %. Autoencoder wurden durch Tang und Yang sowie Chen et al. in ihren Arbeiten [74, 75] zur Klassifizierung näher untersucht. Dabei konnten Erstere eine Fault Detection von bis zu 92,22 % und erzielen und Chen et al. eine Rate von bis zu 98,8 %. Auch Clustering Verfahren, wie k-Means, wurden durch Gharavi und Hu auf ihre Eignung dessen Arbeit [76] zur Fault Detection geprüft und erzielten eine Erkennungsrate von 94,33 %. Santis et al. [77] zeigen, dass genetische Algorithmen in Kombination mit dem k-Means Algorithmus angewendet werden können und eine Detektionsrate von bis zum 94,7 % erreichen. Ebenfalls wurde ein SVM-Classifer implementiert, um die Qualität beider Algorithmen miteinander vergleichen zu können. Ferner werden zum jetzigen Stand weitere Bereiche des ML untersucht. Darunter fallen auch Methoden zur Erkennung und Klassifizierung mit Hilfe von Fuzzy-Logic-Algorithmen. [78] Auffällig bei den Impedanz-, Analytisch- und dem Learning-basierten Methoden ist, dass sie entweder erst durch neue Technologien, wie Smart Metern und Sensoren, in einem zukünftigen CPES ermöglicht werden oder ihre Qualität, durch die daraus folgende bessere Netzobservation, erheblich verbessert werden.

2.5 VERWENDETE TECHNOLOGIEN

Die Simulationsumgebung *pandapower* [12], die für diese Arbeit verwendet werden soll, ist ebenfalls ein OS-Projekt und basiert auf der Datenanalyse Bibliothek *pandas* [79] und

	Elektrisches Modell	Automation	Anpassbarkeit
Kommerzielle Anwendungen	Validiert und einfach zu parametrisieren	Durch starre GUI schwierig zu automatisieren	Eingeschränkte Möglichkeiten
Open Source Anwendungen	Schwer zu parametrisieren	Konsolenanwendung entworfen für automatisierte Evaluationen	Hohe Anpassbarkeit durch Open Source
pandapower	Validiert und einfach zu parametrisieren	Konsolenanwendung entworfen für automatisierte Evaluationen	Hohe Anpassbarkeit durch Open Source

Tabelle 2.1: Vergleich verschiedener Eigenschaften von Simulationsanwendungen (nach [82]).

der Energiesystem-Toolbox *PyPower* [80]. *Pandapower* bietet dieselben Funktionalitäten wie *OpenDSS* und *GridLab-D* und ergänzt diese durch die Möglichkeit ideale Schalter zu verwenden, asymmetrische Impedanzen abzubilden und Stationsäquivalente zu implementieren. [81]

Des Weiteren zeichnet sich *pandapower*, wie andere OS Projekte, durch eine hohe Anpassungsfähigkeit aus, da durch die Quelloffenheit neue Schnittstellen hinzugefügt werden können. Da *pandapower* als Konsolenanwendung entwickelt wurde, können leicht Abläufe automatisiert werden, was bei proprietären Simulatoren oft schwierig umzusetzen ist. Zur Validierung wurde zudem das Verhalten jedes Modellelements von *pandapower* gegenüber den kommerziell verwendeten Simulationen *PowerFactory* oder *PSS Sincal* [83] getestet und geprüft, ob die Lastflussergebnisse übereinstimmen. Zudem können leicht elektrische Modelle parametrisiert werden. Dies liegt darin begründet, dass die Parametrisierung nicht vom Benutzer durchgeführt werden muss, wie es bei anderen OS Projekten der Fall ist, wodurch kein tiefgreifendes Fachwissen über die elektrotechnischen Hintergründe von Energienetzen nötig ist. *Pandapower* verbindet dadurch die positiven Eigenschaften der Anpassbarkeit und Automatisierungsfähigkeit der OS Simulatoren mit denen kommerzieller Simulatoren, wie in [Tabelle 2.1](#) dargestellt. Der Vergleich von Modellen unterschiedlicher Simulationsumgebungen ist schwierig, da sie oft keine einheitlichen Werkzeuge oder Methoden bereitstellen, um vergleichbare Modelle zu gestalten. Es existieren zwar eine Reihe von Datensätzen [84, 85], diese sind jedoch meist speziell, nicht auf Reproduzierbarkeit ausgelegt oder nicht öffentlich zugänglich. [86] Um als Ausgangspunkt zu dienen, wird deshalb *simBench* [13] verwendet. Diese stellen im Rahmen eines Projektes der Universität Kassel entstandene frei zugängliche Datensätze zur Verfügung und beinhaltet eine Möglichkeit alle 13 Grundnetze miteinander zu verschalten und zwischen drei Entwicklungsszenarien zu wählen. Zudem enthalten sie die elektrische Parametrisierung zur statischen Modellierung

von Stromnetzen sowie die Darstellung von Zeitreihen. Die Datensätze betrachtet dabei vor allem die Gegebenheiten des deutschen Energienetzes und werden in verschiedenen Formaten bereitgestellt. Neben den Formaten von kommerziellen Werkzeugen, wie *PowerFactory* und *Integral*, werden die Datensätze auch als Comma-separated values (CSV)-Datei und als Datei des Formats von *pandapower* als Download zu Verfügung gestellt.

2.6 SYSTEMATISCHE LITERATURRECHERCHE

Die systematische Literaturrecherche dient als Ausgangspunkt, um den aktuellen Forschungsstand der betrachteten Thematik zu untersuchen. Durch die systematische Strukturierung der Suche nach relevanter wissenschaftlicher Literatur kann dabei ein umfassender Überblick über die Forschungsfrage gewonnen werden. Hierbei wird Literatur als wissenschaftlich zitierwürdig und -fähig bezeichnet, wenn es sich um wissenschaftlich ausgewiesene Autoren handelt, das Erscheinungsjahr ausgewiesen ist, Standards des wissenschaftlichen Arbeitens erfüllt worden sind und Arbeiten das Peer-Review-Verfahren durchlaufen haben oder in einer Fachzeitschrift publiziert worden sind.

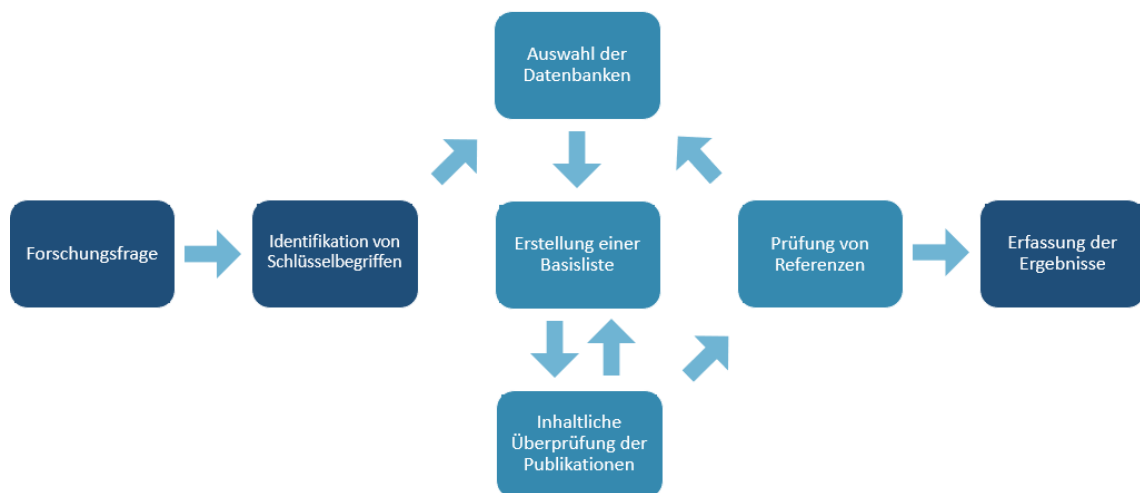


Abbildung 2.5: Vorgehensweise einer systematischen Literaturrecherche (nach [87]).

Eine systematisch durchgeführte Literaturrecherche durchläuft dabei ein bestimmtes Schema. Zunächst wird der Forschungsgegenstand durch eine entsprechende Forschungsfrage formuliert. Diese sollte eine Thematik ansprechen, die wissenschaftlich relevant ist und neue Erkenntnisse im Bezug auf die Frage hervorbringt. Nachdem die Forschungsfrage erarbeitet worden ist, werden Schlüsselbegriffe systematisch identifiziert. Um diese zu erfassen, können unterschiedliche Methoden, wie das Brainstorming, Mind-Mapping

oder die Analyse von Schlagwörtern in relevanter Literatur, verwendet werden, um infolge selbst als Suchbegriffe für die weitere Recherche zu dienen. Demnach folgt die Auswahl von Datenbanken, die für die zu untersuchende Thematik relevant sind. Nachdem diese Rahmenbedingungen festgelegt sind, folgt die eigentliche Recherche. Dazu wird zunächst eine Basisliste aus Publikationen erstellt, welche zunächst relevant für das Thema erscheinen. Darauf folgt eine erste Überblicksanalyse, um häufige Autoren, Titel, Rezensionen, Referenzen heraus zuarbeiten. Ist die Erstellung der Basisliste abgeschlossen, werden die darin enthaltenen Publikationen inhaltlich auf ihre Relevanz geprüft und die Basisliste gegebenenfalls ergänzt. Falls sich bei der inhaltlichen Sichtung neue Begrifflichkeiten oder Autoren herausstellen, die sachdienlich für die Forschungsfrage erscheinen, werden diese ebenfalls inhaltlich auf ihre Relevanz geprüft und der Basisliste hinzugefügt. Dieser Vorgang wird, wie in [Abbildung 2.5](#) dargestellt, beliebig wiederholt bis keine weiteren Publikationen gefunden werden oder bereits eine ausreichend große Sammlung entstanden ist.

Das Ergebnis einer systematischen Literaturrecherche sollte eine Zusammenstellung von zur Forschungsfrage relevanten Quellen ergeben. Besonders Quellen sollten herausgestellt werden, die als wissenschaftliche Fachliteratur zu deklarieren sind, Kernaspekte der Fragestellung differenziert betrachten, empirisch erhobene Daten verwenden, den aktuellen Erkenntnisstand betrachtet oder häufig rezensiert worden sind. Daraus resultiert ein umfangreicher Überblick der betrachteten Thematik auf dessen Grundlage wissenschaftliche Erkenntnisse im Bezug auf die ausgehende Fragestellung gewonnen werden können. [87]

3

Verwandte Arbeiten

In Energienetzen können eine Vielzahl von Faults auftreten, dessen Anzahl sich, je nach betrachtetem Abstraktionsgrad des Energienetzes und Definition, unterscheiden kann. Dadurch wird eine vollständige Auflistung aller Faults, welche in Energienetzen auftreten können, erschwert. Außerdem lassen sich in der Literatur nur wenig breite Auflistungen finden, da viele Arbeiten lediglich einzelne Faults oder Gruppen betrachten und untersuchen. [Abschnitt 3.1](#) stellt aus diesem Grund einige Arbeiten vor, welche Faults in Energienetzen umfangreich auflisten. Auch bei der Kategorisierung von Faults gibt es verschiedene Herangehensweisen, welche sich je nach betrachteten Faktoren unterscheiden können. Das Taxonomieverfahren und die Wahl der darin enthaltenen Kategorien wird durch die betrachtete Domäne beeinflusst. Daher kann sich die Herangehensweise bei der Taxonomie von Faults in einem nicht technischen Umfeld und einer in einem technischen Umfeld unterscheiden und zu unterschiedlichen Vorgehensweisen führen. Ebenso beeinflusst der Zweck der Kategorisierung maßgeblich die Vorgehensweise. Auch domänenspezifische Besonderheiten, wie verwendete Hard- und Software, verändern die Auswahlkriterien nach dem Kategorien gewählt und Faults zugeordnet werden. So spielen Softwarefehler in der IT-Industrie eine wesentlich wichtigere Rolle, als in klassischen Energienetzen. [Abschnitt 3.2](#) soll daher einen Überblick über Taxonomien in verschiedenen Domänen, wie der Softwareentwicklung, Produktion und Energiesystemen, geben und die verschiedenen Vorgehensweisen aufzeigen. Abschließend sollen Modelle von Energiesystemen und deren Umsetzung in [Abschnitt 3.3](#) vorgestellt werden.

3.1 FAULTS IN ENERGIENETZEN

Taft [88] hat in einem Report des Pacific Northwest National Laboratories, das durch das U.S. Department of Energy in Auftrag gegeben worden ist, eine Liste von Faults erstellt, die vorwiegend die Dysfunktion von Stromkreisen innerhalb eines Energienetzes adressiert. In dem Report werden insgesamt 24 Faults aufgelistet, wobei es sich, wie in [Tabelle 3.1](#) zu sehen, vorwiegend um Verdrehte-Faults, Offene-Phase-Faults und Hohe-Impedanz-Faults handelt. Erstere weisen keiner Impedanz auf, wenn sie auftreten. Die zweiten bezeichnen Faults bei denen eine oder mehrere Phasen unterbrochen sind und letztere charakterisieren

Taft

Open Phase Faults:	Bolted Faults:	High Z Faults:	Other:
Blown fuse or dropped primary line, no backfeed	Single Line to Ground	Downed energized primary line, arcing	Sympathetic Trip
Blown transformer fuse or dropped secondary line, no backfeed	Three Line to Ground	Downed energized primary line, non-arcing	Cold load pickup trip
Blown fuse or dropped primary line, backfeed from 3P delta load	Phase to Phase (P-P) (wire sway contact) (momentary)	SLG, non-arcing	Underbuilt fault to transmission circuit
Blown fuse or dropped line, backfeed present from ungrounded capacitor bank	P-P (wire bridge short) (permanent)	Defective grid device, arcing	
Blown fuse or dropped line, backfeed from DG	Single Phase (SP) primary-secondary short	Phase to phase, non-arcing	
Open line connected to another phase	Secondary hot-to-hot short	Phase to phase, arcing	
Open line connected to Neutral/Gnd; no backfeed	Dual Line to Ground	SLG, arcing	

Tabelle 3.1: Auflistung von Faults (nach [88]).

Sarathkumar et al.

Phase-to-Phase	Cyber Security	Source Side Faults
Three Phases Fault	Smart Meter Faults	Converter Faults
Cable Faults	Open Circuit Fault	Load Side Faults
One Phase-to-Ground	Three Phases-to-Ground Fault	Data Communication Faults
Two Phases-to-Ground	Transformer Failure	IoT-Protocoll Failures

Tabelle 3.2: Auflistung von Faults (nach [89]).

sich durch hohen Widerstand bei der Übertragung. Taft listet die Faults in seinem Report nicht nur auf, sondern beschreibt auch die möglichen Auswirkungen auf das Verhalten des Netzes, wie der Abfall der Spannung oder Erhöhung der Impedanz.

Sarathkumar et al. haben hingegen eine allgemeinere Auflistung von Faults in Energiesystem in ihrer Arbeit „A Technical Review on Classification of Various Faults in Smart Grid Systems“ [89] vorgenommen. [Tabelle 3.2](#) zeigt die 15 von den Autoren genannten Faults. Neben der Nennung beschreiben sie zudem die Ursachen, Effekte und Diagnosemethoden. So kann laut Sarathkumar et al. ein Konverter-Fault durch Fehlfunktion von Controllern, Kommunikationsfehlern oder Kurzschlüssen erzeugt werden und zu Gegenleistung, Lichtbogenlöschungen oder Aussetzern führen. Als mögliche Diagnosemethoden geben Sarathkumar et al. an, die Stromrichter oder Steuerwinkel zu regulieren. Unter den aufgelisteten Faults sind außerdem nicht nur Elektro-Ingeneurstechnische Faults, welche auf das Übertragungsnetz oder Erzeuger zurückzuführen sind, sondern auch Faults, die durch die Integration von **IKT** im Stromnetz auftreten können. Darunter fallen Faults, die in Verbindung mit Internet of Things (**IoT**)-Protokollen, Smart Metern, der Datenkommunikation oder Cyber-Security stehen.

Wird die Auflistung betrachtet, die durch Pereira et al. [90] vorgenommen wurde und in [Tabelle 3.3](#) veranschaulicht ist, fällt im Vergleich zu den vorherigen Arbeiten auf, dass diese wesentlich breiter gefächerte Faults auflistet. Die aufgelisteten Faults sind nicht klar voneinander getrennt. So werden Kabel-Faults allgemein aufgelistet, aber auch Unterbrechungen von Kabeln, Kabelüberladungen sowie Erdungen von Kabeln. Dies resultiert aus der Herangehensweise mit dessen Hilfe die Autoren mögliche Faults eruiert haben. Diese haben die in der Literatur betrachteten Faults lediglich aufgezählt. Dadurch sind diese semantischen Doppelungen aufgetreten. Mit 32 unterschiedlichen Faults bietet diese Arbeit einen umfangreichen, aber groben Überblick über mögliche Faults in Energiesystemen.

Bei den hier genannten Arbeiten von Sarathkumar et al., Taft, und Pereira et al. wird

Pereira et al.

Hidden faults of protection	Blackout	Localized blackouts and momentary interruptions	Control infrastructures of smart grids affected
Frequency deviation	Cascading fault	Short circuits	Power loss
Faults and damage to overhead transmission and distribution lines	Transformer slippage on the foundation and fall or complete collapse of the foundation	Stability limits exceeded	Fault of distribution and transmission lines
Cascading outages	Damage and faults on substations	Substation flood	Underground cable loads affected
Flashover of transmission lines	Collapse of transmission towers	Delay, blockage or corruption	Voltage and frequency instabilities
Fault of transformers	Lines disconnected	Transfer capability limited	Economic and social disruptions
Downed wires	Fault currents	Increased current	Line overloads
Line faults	Line overloads	Widespread damage	Cascading failures
Thermal overloads			

Tabelle 3.3: Auflistung von Faults (nach [90]).

deutlich, dass die Aufzählungen durchaus Überschneidungen von Faults aufweisen. Allerdings sind diese in ihrer Abstraktionsebene sehr unterschiedlich. So nennt Pereira et al. zwar Kurzschlüsse als möglichen Fault, differenziert jedoch nicht, wie Sarathkumar et al. und Taft, um welche Art von Kurzschlüssen es sich handelt. Des Weiteren betrachtet Taft spezialisiert Faults in Stromkreisen und berücksichtigt Faults, welche in Beziehung mit Impedanzen stehen. Diese werden explizit nur in dieser Arbeit genannt und berücksichtigt. Außerdem nennen nur Sarathkumar et al. Faults die in IKT hervorgerufen werden können. Durch diese Arbeiten und den darin enthaltenen Auflistungen der Faults in Energienetzen wird deutlich, dass keine vollständige Auflistung existiert und zudem die vorhandenen Auflistungen stark von der Betrachtung abhängig sind.

3.2 KATEGORISIERUNG VON FAULTS

Der Abstraktionsgrad, anhand der die Kategorisierung vorgenommen wird, stellt einen gewichtigen Punkt bei der Erstellung einer Taxonomie dar. Durch die vielen Variablen, die Einfluss auf eine Kategorisierung von Faults nehmen, lässt sich keine allgemeingültige Vorgehensweise finden, sondern sind oft domänenspezifisch auf eine Thematik angepasst. Wie Hasselbring et al. [91] in ihrem Artikel beschrieben haben, hat Knuth [92] im Jahr 1989 eine erste Einordnung von Faults der Software „*tex*“ vorgenommen. Dabei wurden Faults in insgesamt 15 Kategorien eingeordnet, wobei neun dieser Kategorien als „Bugs“ deklariert wurden, welche definitiv behoben werden sollten, da sie das System beeinträchtigen, und die restlichen sechs als „Enhancements“, welche zur Verbesserung der Systems

Elemental Fault	Characteristics	Elemental Fault	Characteristics
Phase of Creation or Occurrence	Development Faults Operational Faults	Intent	Non-Deliberate Faults Deliberate Faults
System Boundries	Internal Faults External Faults	Persistence	Permanent Faults Transient Faults
Dimension	Hardware Faults Software Faults	Capacity	Accidental Faults Incompetence Faults
Phenomenological Cause	Natural Faults Human-Made Faults	Objective	Non-Malicious Faults Malicious Faults

Tabelle 3.4: Elementare Faults (nach [94]).

beitragen. Laut Knuth ist die Zuordnung in die zwei Oberklassen eher willkürlich gewählt. Er führt außerdem an, dass der gleiche Fault durchaus auch in unterschiedlichen Kategorien zugeordnet werden kann, da keine eindeutige Zuordnung möglich ist. Eine abstraktere Kategorisierung wurde von Baizer in seinem Buch „Software Testing Techniques“ [93] vorgenommen. Er unterscheidet die Faults mit Hilfe von acht Oberkategorien mit jeweils zehn Unterkategorien. Dadurch ist die Struktur der Kategorisierung im Gegensatz zu Knuth hierarchisch. Die Oberkategorien betrachten zudem nicht nur Software-Faults durch falsche Implementierung, sondern auch Fehler im Modell der Software oder der Interpretation der Modellierung.

Später haben Laprie et al. in „Dependability and Its Threats: A Taxonomy“ [94] eine Taxonomie formuliert, die auf ebenfalls acht Oberkategorien, den elementaren Faults, basiert. Wie in Tabelle 3.4 dargestellt, können die elementaren Faults lediglich zwei Werte je Fault annehmen. Um einen Fault einer Kategorie zuzuweisen, wird dieser anhand der elementaren Faults betrachtet. Dadurch kann dieser mit Hilfe der acht Eigenschaften genau zugeordnet werden. Neben dieser flachen Taxonomie beschreiben Laprie et al. ebenso eine hierarchische Vorgehensweise, um einen Fault eindeutig zuzuweisen. Der zu betrachtende Fault wird nach einer bestimmten Reihenfolge der elementaren Faults eingeordnet. Jede Ebene des Entscheidungsbaums repräsentiert einen elementaren Fault. Anhand der festgestellten Eigenschaften kann der Fault wiederum einer bestimmten Ursache zugewiesen werden, welche folglich in drei größere Gruppen „Development-Faults“, „Physical-Faults“ und „Interaction-Faults“ gegliedert werden kann.

Gapsi und Zalila haben in „Fault Tolerance for Distributed Real Time Dynamically Reconfigurable Systems from Modeling to Implementation“ [96] eine Kategorisierung mit sechs elementaren Kategorien vorgenommen, die auf Powell et al. zurückzuführen ist. Diese haben in ihrem Buch [95] eine Kategorisierung vorgestellt, welche auf der von Laprie et al. basiert. Jedoch haben sie die ursprünglich Anzahl von acht elementaren Faults, wie oben erwähnt, um zwei Kategorien reduziert. Dafür haben sie die Kategorien „Intent“, „Capacity“

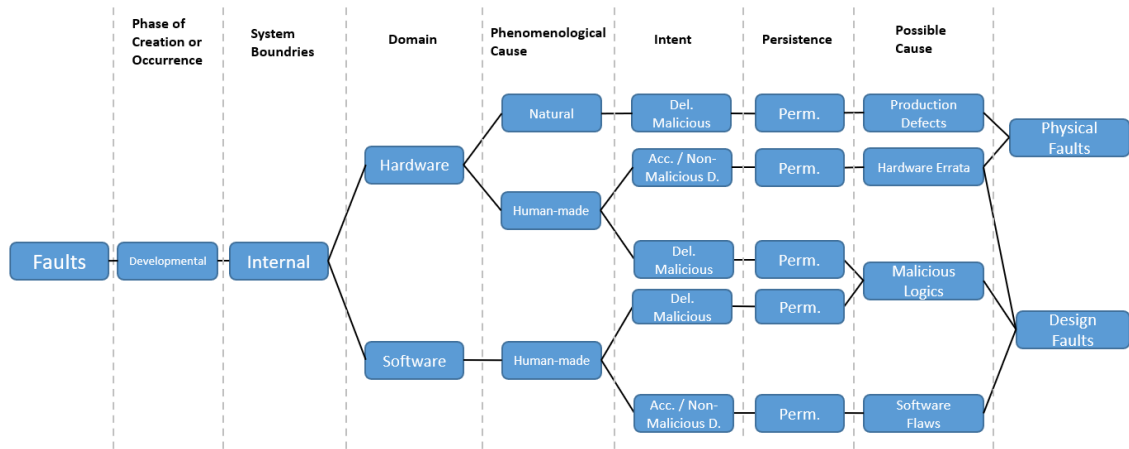


Abbildung 3.1: Teilbaum des Kategorisierungsbaums (nach [95]).

und „Objective“ zur Kategorie „Intent“ zusammengeführt. Wie in [Abbildung 3.1](#) dargestellt, bieten die Autoren einen ähnlichen Entscheidungsbaum an, wie Laprie et al., mit sechs Entscheidungsebenen. Allgemeiner wurde von Alonso et al. in „The nature of the times to flight software failure during space missions“ [97] eine Kategorisierung vorgenommen. Die Autoren unterscheiden die aufgetretenen Faults lediglich durch zwei Kategorien. Zum einen ob es sich dabei um sogenannte „Bohrbugs“ oder „Mandelbugs“ handelt. Erstere bezeichnen dabei die Faults, welche sich leicht zurückführen und reproduzieren lassen, wodurch diese Faults mit wenig Aufwand behoben werden können. Die Mandelbugs hingegen bezeichnen Faults, welche nur sporadisch oder für den Programmierer willkürlich auftreten ohne diesen auf ihren tatsächlichen Ursprung zurückführen zu können. Alonso et al. unterscheiden in einer weiteren Hierarchieebene der Mandelbug zudem noch, ob diese „Aging-related“ oder „Non-aging-related“ sind, um eine spezifischere Handlungsempfehlung für eine mögliche Behebung des Bugs geben zu können.

Einen anderen Ansatz verfolgen Knüppel et al. in „A Universal Approach to Categorize Failures in Production“ [98] im Bereich der Produktion. Allerdings ist die Vorgehensweise der Zuordnung eine andere zu den oben genannten Taxonomien in der Softwareentwicklung. Die Autoren haben zunächst drei grundlegende Fragen formuliert „Was ist fehlgeschlagen?“, „Wie ist es fehlgeschlagen?“ und „Wo ist es fehlgeschlagen?“. Daraus ergeben sich drei übergeordnete Kategorien „Object“, „Type“ und „Location“, welche jeweils bestimmte Eigenschaften aufweisen. Bei der Kategorisierung eines Faults wird dieser zunächst beschrieben und dann genau einer Eigenschaft der überliegenden Kategorien zugeordnet. Dadurch wird der Fault nicht nur zugeordnet, sondern auch ausreichend beschrieben, um eine weitere Fehlerbehandlung zu initialisieren.

Eine ähnliche Vorgehensweise verfolgen Chi et al. in „Classification Scheme for Root Cause and Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) of Passenger Vehicle Recalls“ [99], um Defekte bei Fahrzeugen zu kategorisieren. Sie unterscheiden diese in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird der Defekt einer von drei Oberkategorien zugeordnet und danach spezifischer eingeordnet. Darauf folgt die Feststellung in welcher Komponente der Defekt aufgetreten ist. Eine generalisiertere Taxonomie wurde durch die SINTEF [100], eine unabhängige norwegische Forschungsorganisation, für die Ölindustrie entwickelt. Die als PDS-Methode [101] bezeichnete Taxonomie ist ein flacher Entscheidungsbaum, der zunächst zwischen „Random-Hardware-Fault“ und „Systematic-Fault“ unterscheidet. Auf der nächsten Ebene werden die Faults im Falle einer vorherigen Zuordnung in die erste Kategorie direkt in „Aging Failure“ und im Falle der zweiten Zuordnung in eine von fünf unterschiedlichen Kategorien eingeordnet. Die Kategorien „Software Faults“, „Installation Failure“, „Operational Failure“, „Design Relative Failure“ und „Excessive Stress Failure“ stellen dabei nur eine grobe Einordnung der Faults dar.

In dem bereits in [Abschnitt 3.1](#) genannten Report von Taft [88] hat dieser ebenfalls eine Taxonomie von Faults vorgenommen. Als Einordnungsmethode wird eine Baumstruktur verwendet. Auf der ersten Ebene wird der Fault in den Kategorien „Verschraubte Faults“, „Offene Phase Faults“ und „Hohe Impedanz Faults“ eingeordnet. In der nächsten Ebene werden die Faults näher spezifiziert. Verschraubte Faults können folglich die Eigenschaften „momentan“ oder „nachhaltig“ zugeordnet werden. Offene Phasen Faults sind wiederum in die Eigenschaften „nur offen“, „Pfad zur Erde“ oder „Pfad zu einer Phase“ einzuordnen und Faults mit hoher Impedanz sind entweder „wechselnd“ oder „persistent“.

Otuoze et al. haben in ihrer Arbeit „Smart grids security challenges: Classification by sources of threats“ [102] Gefahren in Smart Grids klassifiziert. [Abbildung 3.2](#) zeigt den Baum, welcher eine flache Hierarchie aufweist und die Gefahren anhand ihrer Ursache zuordnet. Dargestellt ist, dass zunächst eine Unterscheidung zwischen zwei Kategorien vorgenommen wird, um zu entscheiden, ob die Gefahr durch einen technischen oder nicht technischen Ursprung hervorgerufen wurde. In der letzten Ebene des Baumes werden die Gefahren eindeutig eine Kategorie zugeordnet. Die Blätter des Baumes decken dabei ein großes Spektrum an Ursachen ab. Unter infrastrukturellen Sicherheit, fällt somit eine Reihe an möglichen Ursachen, wie Diebstahl, Vandalismus, Terrorismus und Verteidigung von Netzkomponenten.

Eine weitere Kategorisierung von Faults in Energienetzen haben Pereira et al. in „A Survey on Power Grid Faults and Their Origins: A Contribution to Improving Power Grid Resilience“ [90] vorgenommen. Sie haben die Faults ebenfalls ihrer Ursache zugeordnet. Allerdings verwendet sie dabei keine Baumstruktur, sondern ordnen den Fault direkt den drei Klassen „Natürlicher Ursprung“, „Fehler“ und „Attacken“ zu. Faults des natürlichen

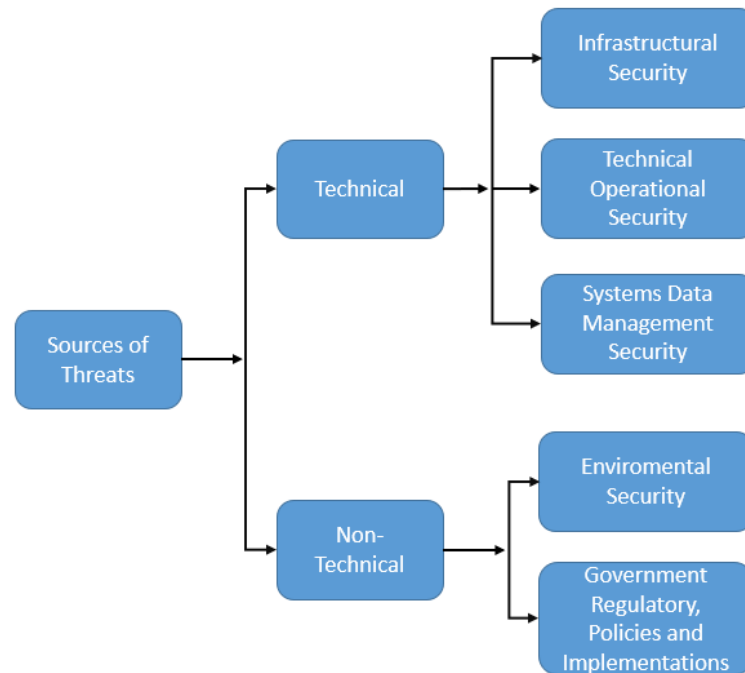


Abbildung 3.2: Vereinfachte Darstellung des Kategorisierungsbaums für Smart Grid Gefahren (nach [102], Original [Abbildung A.10](#)).

Ursprungs werden durch jegliche Fehlfunktion charakterisiert, die durch Naturgewalten hervorgerufen worden sind, wie Überschwemmungen, Tornados oder Sonneneruptionen. Als Fehler zugeordnete Faults bezeichnen hingegen, die auf menschliches Versagen oder Materialversagen zurückzuführende Fehlfunktion. Unter Attacken fallen hingegen die Faults, welche durch böswillige Aktionen herbeigeführt wurden, wie Cyber-Angriffe, also Distributed Denial of Service (DDoS) oder Man-In-The-Middle Angriffe, aber auch direkte physische Angriffe auf das Netz beziehungsweise auf Netzkomponenten durch Terrorismus oder Vandalismus. Faults, wie Blackouts, Fehlerstrom oder Übertragungsfehler, können in dieser Kategorisierung auch in mehreren Gruppen auftreten und zugewiesen werden, da gleiche Faults unterschiedlichen Ursachen zugeordnet werden können.

Des Weiteren haben Sarathkumar et al. [89] spezifisch Faults kategorisiert, die in Transportleitungen auftreten. Dabei kategorisieren sie diese in einem Baum. Zunächst wird der Fault zwischen Kurzschluss und offenem Konduktor unterschieden. Letzteres bezeichnet eine Unterbrechung des Übertragungskabels ohne das es zu einem Kurzschluss, also Phase-zu-Phase oder Phase-zu-Grund, kommt. Diese Faults werden in der nächsten Ebene zwischen der Anzahl der unterbrochenen Konduktoren unterschieden. Bei Kurzschlüssen wird auf der selben Ebene zwischen asymmetrischen und symmetrischen Faults unterschieden.

den. Zuletzt werden die Faults, welche zuvor als Kurzschlüsse klassifiziert worden sind, noch beschrieben, ob es sich um beispielsweise Phase-zu-Phase, Phase-zu-Phase-zu-Phase oder Phase-zu-Grund, handelt.

Abschließend zu den bereits genannten Taxonomien wurden durch Medeti und Singh [103] Faults innerhalb eines Photovoltaiksystems kategorisiert. Im Gegensatz zu den anderen Einordnungen in der Energiedomäne, unterscheiden die Autoren zunächst, ob der Fault innerhalb des Gleichstrom- oder Wechselstromsystems aufgetreten ist. Danach folgt eine Zuordnung der Folgen, die aus dem Fault resultieren, also ob diese einen Blackout oder einen Netzausfall herbeigeführt haben. In den letzten Ebenen werden die Faults nach ihrer Ursache klassifiziert. Diese werden zunächst unspezifisch zugeordnet und weiterführend in differenziertere Klassen eingeordnet. Dabei werden die genauen Ursachen, wie Phase-zu-Phase, Schaden durch Vögel oder Blätter, Blitzeinschläge oder aber auch Alterung der Module, genannt. Die Eingangs erwähnten Kriterien und Problematiken für die Erstellung von Taxonomien werden bereits bei den Taxonomien in der Softwareentwicklung deutlich. Knuth und Baizer [92] haben lediglich eine lose Einordnung ohne konkrete Differenzierung vorgenommen. Die Taxonomie von Gabsi und Zalila [96] hingegen ist wesentlich konkreter bei der Kategorisierung, um Faults korrekt zuzuordnen. Bis wiederum eine wesentlich vereinfachte Kategorisierung durch Alonso et al. [97] vorgenommen wurde. Diese Beispiele zeigen, dass sich aufgrund des Abstraktionsgrades und dem Zweck der Taxonomie, sich die Vorgehensweisen stark unterscheiden können. Dies ist auch bei den Taxonomien, welche von Knüppel et al. [98], Chi et al. [99] und der SINTEF [100] vorgenommen wurden, zu erkennen. Die Taxonomien, mit dessen Hilfe die Faults innerhalb von Energiesystemen eingeordnet wurden, zeigen zudem, wie sehr die Betrachtungsweise die Vorgehensweise bei der Taxonomie unterscheidet. Taft [88], Sarathkumar et al. [89] und Maditi und Sing [103] zeigen, dass sie unterschiedliche Taxonomien vornehmen obwohl sie Energiesysteme beziehungsweise Stromnetze und insbesondere deren Faults betrachten. Wobei die Kategorisierung von Kurzschlüssen dabei im Vordergrund steht. Bei Otouze et al. [102] und Pereira et al. [90] werden Kurzschlüsse jedoch nicht weiter beleuchtet. Dahingegen werden die Faults in anderen Kategorien eingeordnet, um auch Faults zu berücksichtigen, welche in CPES vorkommen können.

3.3 MODELLIERUNG VON CYBER-PHYSISCHEN ENERGIESYSTEMEN

Neben dem konventionellen Stromnetz, werden in manchen Modellen auch Komponenten aus einem CPES modelliert und implementiert. Durch die steigende Komplexität der

Systeme fokussieren sich viele Modelle jedoch oft auf bestimmte Problemstellungen, wie der Cyber-Security oder der Wide Area Situational Awareness (WASA), wodurch auch unterschiedliche Werkzeuge und Technologien zum Einsatz kommen. Um das Verhalten eines Energienetzes bei Cyber-Angriffen zu untersuchen, wurde ein Netz mit Hilfe von PowerWorld [55] modelliert und die Netzwerkkomponenten mit RINSE [58] von Davis et al. simuliert. [104] Ein ähnlicher Ansatz wurde von Mallouhi et al. [105] verfolgt. Die Netzkomponente wurde ebenfalls mit *PowerWorld* umgesetzt und die Netzwerkkomponente mit OPNET [59], um, wie bei Davis et al., Cyber-Angriffe zu untersuchen. [104] Dabei wurde die Erkennung von DDoS-, Man-In-The-Middle-Angriffen, Spoofing und weiteren Angriffe untersucht. Ebenso wurde für diesen Zweck von Butler et al. [106] eine Simulation mit Hilfe von RTDS [54] als Netzsimulator und OPNET erstellt, um Angriffe in Echtzeit zu simulieren und dessen Auswirkungen auf das Netz zu evaluieren. Bei diesen Simulationen interagieren zwei Simulationsplattformen miteinander, um ein CPES abbilden zu können. Dies ist notwendig, da die Simulationen mit Schwerpunkt auf die Erkennung von Cyber-Angriffen, besonders die Cyber-Ebene, genau abbilden können müssen. Ebenso wurden weitere Bereiche eines CPES untersucht. Durch Ghaemi und Schneider wurde in [107] anhand von GridLAB-D [57] ein CPES modelliert, mit dessen Hilfe das Potential der Laststeuerung von privaten Haushalten untersucht wurde. Neben den klassischen Bestandteilen eines Energienetzes wurden hierbei auch Energiespeicher in privaten Häusern betrachtet. Zur Untersuchung von Faults innerhalb eines CPES sind ebenfalls Simulationen durchgeführt worden, um ihre Auswirkungen zu untersuchen und Methoden zu evaluieren, diese zu lokalisieren und zu prognostizieren. In der Publikation [108] von Ivanov et al. wurde zur Erkennung von Fehlern, die auf Fehlfunktionen von Multilevel-Konvertern zurückzuführen sind, eine Netztopologie modelliert. Dabei wurde das Modell innerhalb der MatLab-Software [109] erstellt und evaluiert. Die Simulation von Stanovich et al. in [110] untersucht mittels RTDS die Modellierung eines modernen Energienetzes. Das Modell soll die Vorteile eines SG-Konzepts, welches von den Autoren vorgestellt wurde, aufzeigen. Zudem wird dabei untersucht, ob das System die Isolation von Bereichen des Netzes erkennt, die durch Faults verursacht worden sind. Eine weitere Möglichkeit, die komplexen Zusammenhänge innerhalb eines Stromnetzes zu simulieren, stellen Co-Simulatoren dar. Mit dessen Hilfe können verschiedene Simulationsumgebungen, wie *PowerWorld* [55] oder *PyPower* [80], zusammenarbeiten und dabei selbständig ausgeführt werden. Die Co-Simulationsplattform orchestriert dabei als übergeordnete Instanz die beteiligten Komponenten. Sie synchronisiert die Abläufe der Komponenten und verwaltet den Datenaustausch zur reibungslosen Funktion. [111] [112] Beispiele für Co-Simulationsplattformen sind *mosaik* [113] und *High Level Architecture (HLA)*-basierte Plattformen. [114] Erstere wird von Steinbrink et al. in seiner Arbeit „Towards domain-specific surrogate models for smart grid co-simulation“

[111] verwendet, um ein Ersatzmodell von einem SG zu erstellen. Hierfür wurde *pandapower* [12] als Simulator verwendet. *Pandapower* bietet die Möglichkeit verschiedene vorgefertigte Netze zu verwenden. Steinbrink et al. haben das Netz „CIGRE low voltage benchmark grid“ [115] als zugrunde liegendes Netzmodell ausgewählt. Dabei wird ein Niederspannungsnetz modelliert, welches Subnetze mit Industrieanlagen, Unternehmensgebäuden und Wohnhäusern beinhaltet. Auf der gleichen Grundlage wurde eine Simulation von Balduin et al. [112] vorgenommen, die einen Datensatz mit Hilfe von *simBench* [13] erzeugen soll. Dieser wurde wiederum dafür genutzt verschiedene ML-Algorithmen zu evaluieren, um ein möglichst gutes Ersatzmodell zu erzeugen. In der Arbeit von Thurner und Braun [116] wurden Modelle von Hochspannungsnetzen in *pandapower* erstellt. Sie haben dafür alle wesentliche Bestandteile des Netzes modelliert, wie Transformatoren mit zwei und drei Windungen, Leitungen, synchrone Generatoren und asynchrone Maschinen, um Kurzschlussspannungen durch vektorisierte Berechnungen zu finden. Dabei sollten insbesondere verteilte Energieerzeuger berücksichtigt werden und es sollte der Standard IEC 60909 erfüllt werden.

Anhand der genannten Modelle und der verwendeten Simulationsumgebungen kann daraus geschlossen werden, dass oftmals ein konkretes Modell für das betrachtete Problem erstellt wird. Dies führt zu sehr spezialisierten Modellen, welche lediglich in dem dafür vorgesehenen Kontext eine sinnvolle Implementierung darstellt und somit nicht allgemein wiederverwendbar ist. Daraus resultiert auch, dass sich Lösungen für grundsätzlich ähnliche Problemstellung schwer miteinander vergleichen lassen. Zudem kann die Reproduktion solcher Modelle durch Lizenzgebühren erschwert werden, wie bei Davis et al. [104] und Mallouhi et al. [105], die jeweils die kommerzielle Umgebung *PowerWorld* zur Erstellung ihres Modells verwenden. Durch *pandapower*, *GridLAB-D* oder *MatLab* sind bereits OS-Anwendungen verfügbar und finden auch Verwendung in verschiedenen Anwendungsfällen, wie zu Fault-Erkennung und als Grundlage für Ersatzmodelle beziehungsweise derer Erzeugung.

4

Literaturrecherche

In diesem Kapitel wird eine systematische Literaturrecherche, angelehnt an die in [Abschnitt 2.6](#) vorgestellte Vorgehensweise, durchgeführt. Mit Hilfe dieser soll eine Liste an Faults bereitgestellt werden, um eine Übersicht über mögliche Faults in einem CPES zu erhalten. Dafür wurden in [Abschnitt 4.1](#) zunächst Rahmenbedingungen festgelegt, um die Literaturanalyse einzugrenzen und die zentrale Fragestellung zu formulieren. Die Vorgehensweise nach der die Ergebnisse erarbeitet werden, sind in [Abschnitt 4.2](#) beschrieben. Da das ursprüngliche Verfahren angepasst wurde, wird dieses auch in diesem Unterkapitel vorgestellt und die Gründe für die Änderung beschrieben sowie die angepasste Vorgehensweise. Beendet wird das Kapitel mit der Vorstellung der gefundenen Faults in [Abschnitt 4.3](#). Um weitere Erkenntnisse, die sich aus der Durchführung ergaben und nicht als Ergebnissen zu definieren sind, zu beschreiben, wurde diese in [Unterabschnitt 4.3.1](#) erfasst.

4.1 FESTLEGUNG DER RAHMENBEDINGUNGEN

Die Formulierung einer Fragestellung bildet einen wichtigen Grundbaustein einer systematischen Literaturanalyse und dessen Rahmenbedingungen. Außerdem werden Ausgangspunkte definiert, wie wissenschaftliche Arbeiten oder Schlagwortsammlungen, die direkten Bezug auf die gegebene Fragestellung haben. Im Mittelpunkt dieser Literaturrecherche steht die Frage:

Welche Faults können in einem CPES auftreten?

Dabei werden Faults, wie in [Kapitel 1](#) definiert, sodass jegliche Störung, die den normalen Betrieb des Netzes beeinträchtigt, als Fault bezeichnet wird. Diese Definition beinhaltet alle Arten von Faults, wie mechanische Schäden von Komponenten des physischen Netzes sowie der IKT-Hardware, ebenso wie Software- und Datenübertragungsfehler. Eine Eingrenzung des Begriffs wird jedoch vorgenommen indem spezielle Generatorfehler und Cyber-Attacken nicht berücksichtigt werden. Erstere stellen dabei Fehler dar, die in Generatoren, wie Photovoltaikanlagen, Windkraftanlagen oder Wasserkraftwerken, auftreten. Als Beispiel solch eines Fehlers ist der Ausfall einer Zelle innerhalb eines Solarpanels durch einen Kurzschluss [\[117\]](#) oder der Ausfall einer Windkraftanlage durch ein defektes Kugellager

[118] zu nennen. Es werden jedoch generische Generatorfehler betrachtet, wie der Ausfall oder eine Dysfunktion von Generatoren, welche über die meisten Generatortypen hinweg auftreten können. Über den zeitlichen Aspekt hinaus, werden Cyber-Angriffe zudem nicht betrachtet, da diese nicht unmittelbar eine Störung hervorrufen, sondern nur ein externer Auslöser für Störungen innerhalb des Energienetzes sind. Aus diesem Grund werden auch keine äußeren Einflussfaktoren, wie Umweltkatastrophen, Bedienungsfehler, menschliches Versagen, Terrorismus oder Vandalismus, als Fault aufgelistet und berücksichtigt, da diese lediglich die Ursache für einen Fault darstellen.

Der zu Beginn genannte Ausgangspunkt für die Literaturanalyse ist die Arbeit „A Survey on Power Grid Faults and Their Origins: A Contribution to Improving Power Grid Resilience“ [90] von Mar, Pereira und Martins und wird weiterhin als Quelldokument bezeichnet. Dieses Survey-Paper ist im 9. Dezember 2019 durch Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) im Journal MDPI-Energies Band 12 veröffentlicht worden. Die Arbeit erfüllt mehrere grundlegende Voraussetzungen, um als wissenschaftlich zitierwürdig bezeichnet zu werden, da die Autoren weitere Publikationen veröffentlicht haben, die Arbeit das Peer-Review-Verfahren durchlaufen hat und in einem Journal veröffentlicht worden ist. Neben den formalen Aspekten bietet sich diese Arbeit inhaltlich an, da in dieser bereits eine Vielzahl von Faults genannt worden sind und zudem auch umfangreich durch Quellen belegt worden sind.

4.2 DURCHFÜHRUNG

Zu Beginn der systematischen Literaturrecherche wurde mit Hilfe der Faults, welche von Pereira et al. [90] im Quelldokument genannten worden sind, eine Basisliste erstellt. In dem Quelldokument wurden 33 verschiedene Faults aufgelistet, wie in [Tabelle 3.3](#) zu sehen ist. Als nächster Schritt wurden die Quellen des Quelldokuments betrachtet und überprüft, ob diese zur Untersuchung der Forschungsfrage beitragen kann und die Rahmenbedingungen erfüllen. Dabei erfüllten 72 der 134 untersuchten Quellen die Kriterien und es wurden weitere 34 Faults der Basisliste beigefügt, sodass diese nun 67 Faults beinhaltet und die erste Iteration der Literaturrecherche abgeschlossen ist. Als weiteres Vorgehen wurde ursprünglich vorgesehen die Quellen der Quellen des Quelldokumentes zu betrachten und somit nach dem Schneeball-Prinzip die Quellen zu analysieren. Allerdings kann diese Vorgehensweise zu Problematiken führen, die die systematische Literaturrecherche beeinträchtigen können. [119] Zu diesen Problematiken gehören:

- Die Anzahl der zu betrachteten Quellen steigt exponentiell an, da jede Quelle wiederum eine Vielzahl an weiteren Quellen besitzt. Die Analyse dieser großen Anzahl

ist in dem in dieser Arbeit gesetztem zeitlichen Rahmen nicht möglich.

- Die gefundenen Quellen werden immer älter, da sich die Quellen der betrachteten Arbeit stets in der Vergangenheit befinden.
- Es kann dazu kommen, dass Autoren sich immer wieder gegenseitig zitieren, sodass keine breite und unabhängige Analyse möglich ist, da sich die Quellen innerhalb eines „Autorenkreises“ befinden.
- Durch einen thematischen Schwerpunkt in der Urquelle können sich die enthaltenen Quellen in einen für die Forschungsfrage nicht relevanten Bereich verschieben.

Ein Teil dieser Problematiken, wie die exponentiell wachsende Anzahl der Quellen, der immer weiter zurückliegende Veröffentlichungszeitpunkt und der Tendenz zu einer bestimmten Thematik, haben dazu geführt, dass die in dieser Arbeit verfolgte Vorgehensweise angepasst wurde. Da in dieser Literaturrecherche auch Faults gefunden werden sollen, welche die Cyber-Ebene eines CPES einschließen soll, ist es auch notwendig aktuelle Arbeiten zu berücksichtigen, da die Einflechtung von IKT in das konventionelle Energienetz erst in jüngerer Vergangenheit stattgefunden hat und immer noch stattfindet [120].

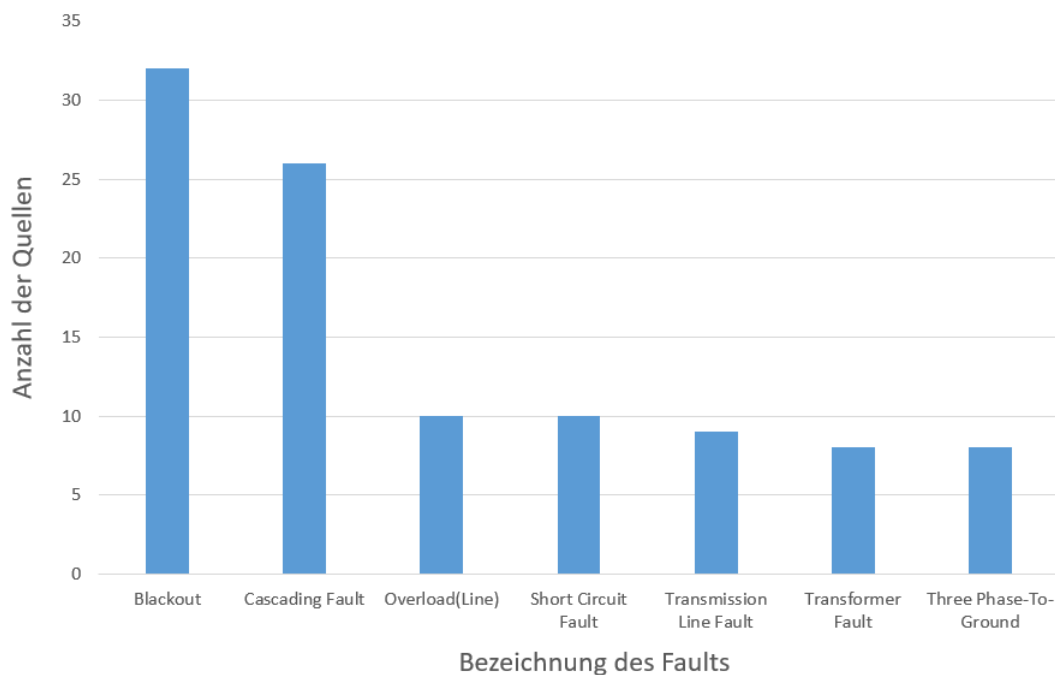


Abbildung 4.1: Anzahl der Quellen der sieben häufigst genannten Faults nach der ersten Iteration (eigene Darstellung).

Außerdem beziehen sich viele Quellen des Quelldokumentes auf die Thematik der Verbesserung der Resilienz eines Energiesystems. Dadurch sind Faults, wie in [Abbildung 4.1](#) dargestellt, wesentlich häufiger genannt worden als andere Faults. Besonders Faults, welche Einfluss auf die Funktionalität des gesamten Netzes haben, wie Blackouts oder kaskadierende Faults, werden wesentlich häufiger genannt als solche, welche lediglich partielle Ausfälle hervorrufen können, da diese im direktem Zusammenhang mit der Resilienz eines Netzes stehen. Die Vorgehensweise wurde aus diesen Gründen dahingehen angepasst, dass nun die in der Basisliste enthaltenen Faults zur weiteren Untersuchung verwendet wurden. Die Vorgehensweise besteht aus der Auswahl von drei zufällig gewählten Quellen aus wissenschaftlichen Bibliotheken, wie IEEE Xplore [121] oder Wiley Online Library [122], welche die Forschungsfrage und die Rahmenbedingungen erfüllen sowie das gewählte Schlagwort enthalten. Dabei muss das gewählte Schlagwort in einem semantisch korrekten Zusammenhang mit der ausgewählten Quelle stehen. Zum Beispiel wäre für den Fault „Arcing (Line)“ eine valide Quelle eine, die Lichtbögen im direkten Zusammenhang mit Leitungen benennt. Eine Quelle in der Lichtbögen in unmittelbaren Zusammenhang mit Umspannwerken genannt werden und in denen ohne semantische Verbindung ebenfalls das Wort Leitungen verwendet wird, stellt jedoch keine valide Quelle für das gewählte Schlüsselwort dar, obwohl es die sonstigen Anforderungen erfüllt. Die Anpassungen des Vorgehens führen zu einem dazu, dass eine kalkulierbare Menge an zu untersuchenden Quellen erfasst werden kann, welche maximal linear anwächst, und zum anderen verbessert die zufällige Auswahl zudem die Heterogenität der Quellen, da sich diese nicht zwingend in einem bestimmten Zeitraum befinden müssen und nicht an eine andere Quelle gebunden ist. Anhand der geschilderten Vorgehensweise wurde eine weitere Iteration durchgeführt, um die gegebenen Schlagwörter aus der Basisliste zu untersuchen.

4.3 ERGEBNIS

Um die in dieser systematischen Literaturrecherche formulierten Forschungsfrage zu untersuchen wurden insgesamt 304 Quellen analysiert. Von diesen Quellen haben 242 Quellen die Rahmenbedingungen erfüllt und die Forschungsfrage beantwortet, sodass gefundene Faults der Basisliste hinzugefügt werden konnten oder die Quelle zu bereits anderen genannten Quellen eines Faults hinzugefügt werden konnte.

Nach der ersten Iteration wurden, wie bereits in [Abschnitt 4.2](#) erwähnt, insgesamt 72 Faults gefunden und in der Basisliste aufgenommen. Die [Tabelle 4.1](#) listet diese mit den dazu gehörenden Quellen auf. Wird die Liste der gefundenen Faults nach der ersten Iteration betrachtet, fällt auf, dass diese viele allgemeine Faults beinhaltet. Zum Beispiel werden Faults meist ganzen Komponenten zugeschrieben, wie Insulator-, Generator-, Transformator-,

Name	Quelle	Name	Quelle
Arcing (Line)	[123]	Interdependent Failures	[124]
Bad Model For SCADA	[125]	Line Fault	[126, 127, 128, 129] [130, 131, 132]
Bad Software Recommendation	[133]	Line Sagging	[134, 135]
Balanced Fault	[136, 137] [139, 140, 141, 142] [143, 144, 145, 125] [146, 147, 148, 149]	Tripping(Line)	[138]
Blackout	[150, 151, 152, 138] [153, 128, 154, 130] [129, 155, 156, 126] [157, 135, 158, 159] [124, 127, 132, 160]	Lost Synchronism	[143]
Blown Fuse	[128, 161] [140, 162, 142, 129] [126, 153, 127, 163] [164, 152, 165, 138]	Overexcitation (Generator)	[152]
Cascading Fault	[159, 128, 143, 145] [130, 132, 160, 149] [147, 148, 166, 167] [168, 150]	Overhead Line Failure	[123, 129, 140, 166]
Circuit Breaker Fault	[165]	Overhead Tower Malfunction	[132, 134, 169, 147] [129]
Common Cause Fault	[130]	Overload (Line)	[129, 142, 143, 145] [148, 149, 170, 126] [171, 125]
Compatibility Problem	[125]	Overvoltage	[138]
Conductor Galloping	[123]	Phase-To-Phase Fault	[136, 141, 170, 172] [173]
Connecticon Failures (ICT)	[125]	Physical Attack On Smart Meter	[125]
Control Cubicle Fault	[134]	Power Grid Fault	[129]
Converter Fault	[161]	Power Plant Shutdown	[146, 174]
Current Overload	[143, 173]	Protection Relay Fails	[126, 175] [142, 176, 137, 173]
Data Transfer Delay	[125]	Short Circuit Fault	[127, 123, 177, 134] [170, 129]
Data Transfer Interrupted	[125, 130]	Single Phase-To-Ground Fault	[170, 149, 141, 172]
Disconnected Switches	[165]	Software Fault	[159, 126, 152]
Distribution Line Fault	[129, 132, 169, 146]	Substation Fault	[128, 174, 146, 158] [159, 178]
Double Phase-To-Ground Fault	[141, 143, 176]	Switch Gear Fault	[134]
Downed Wires	[129]	Thermal Overload	[129, 138] [145, 175, 172, 137]
False Load Forecast	[125]	Three Phase-To-Ground Fault	[143, 161, 170, 176] [138, 129, 174, 157]
False Sensor Data	[125]	Transformer Fault	[179, 165, 178, 128]
Flashover (Line)	[134, 123, 129]	Transformer Wings Malfunction	[134] [139, 132, 134, 135]
Frequency Deviation	[129, 138]	Transmission Line Fault	[165, 151, 158, 159] [169]
Generator Fault	[124, 157, 158]	Unbalanced Fault	[136, 137]
Tripping (Generator)	[159, 142, 126, 143]	Underexcitation (Generator)	[152]
Ground Fault	[173, 161]	Underfrequency	[138, 155, 143]
Hardware Fault	[159, 138]	Underground Cable Fault	[129]
Hidden Failures (Protection Devices)	[139, 129, 152]	Unsynchronized Data In Scada System	[125]
Incorrect Software Logic	[138]	Upstream Network Fault	[180]
Insulator Fault	[134]	Utility Pole Malfunction	[178]
Inter Circuit Fault	[142]	Voltage Sag	[125, 137]

Tabelle 4.1: Basisliste nach der ersten Iteration.

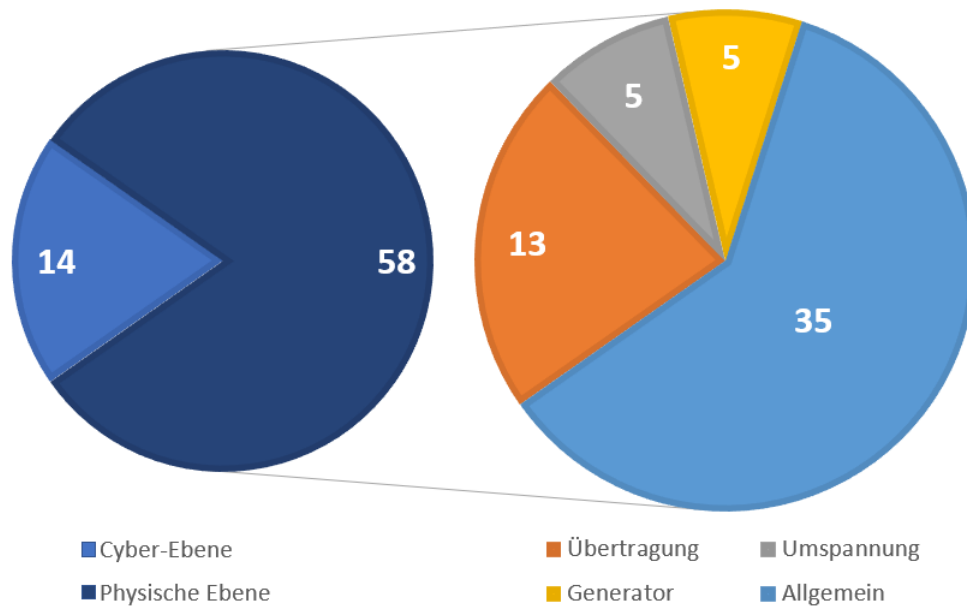


Abbildung 4.2: Verteilung der Faults nach der ersten Iteration nach Ebene und Bezug (eigene Darstellung).

Verteilungskabel-, Transportkabel-, Kontrollstations-, Konverter-, Überkopfleitungs-, Hardware- oder Kabel-Faults und selten spezifisch einem Einzelteil.

Der [Abbildung 4.2](#) ist zu entnehmen, dass circa 80 % der gefundenen Faults auf der physischen Ebene zu finden sind. Bei genauerer Betrachtung können 13 Faults eindeutig der Übertragung zugeordnet werden. Weiter können jeweils fünf Faults der Umspannung und der Generation von Energie zugeschrieben werden. Die restlichen 35 Faults stellen vor allem Faults dar, die entweder sehr generisch sind, wie Kurzschlüsse zwischen Leitungen oder Erdungen, die in vielen Komponenten auftreten können, oder Faults in Komponenten, die in allen Teilen des Netzes Verwendung finden, wie Isolatoren, und nicht explizit im Kontext der gewählten Gruppen genannt worden sind oder das Netz insgesamt betreffen, wie Blackouts oder kaskadierenden Faults.

Durch die zweite Iteration der Literaturrecherche sind in insgesamt 170 weiteren untersuchten Quellen 99 Faults der Basisliste hinzugefügt worden. Die vollständige Auflistung aller Faults sind in [Tabelle A.1](#) bis [Tabelle A.3](#) auf gleicher Art, wie in [Tabelle 4.1](#), aufgelistet und im Anhang dieser Arbeit zu finden.

[Abbildung 4.3](#) zeigt, dass sich das Veröffentlichungsjahr der in der zweiten Iteration ausgewählten und betrachteten Quellen hauptsächlich in den letzten 20 Jahren befindet. Dabei sind rund 50 % der gefundenen Quellen nach 2013 veröffentlicht worden, bei circa 75 % der Quellen liegt das Veröffentlichungsjahr nicht weiter zurück als 2007. Allerdings ist

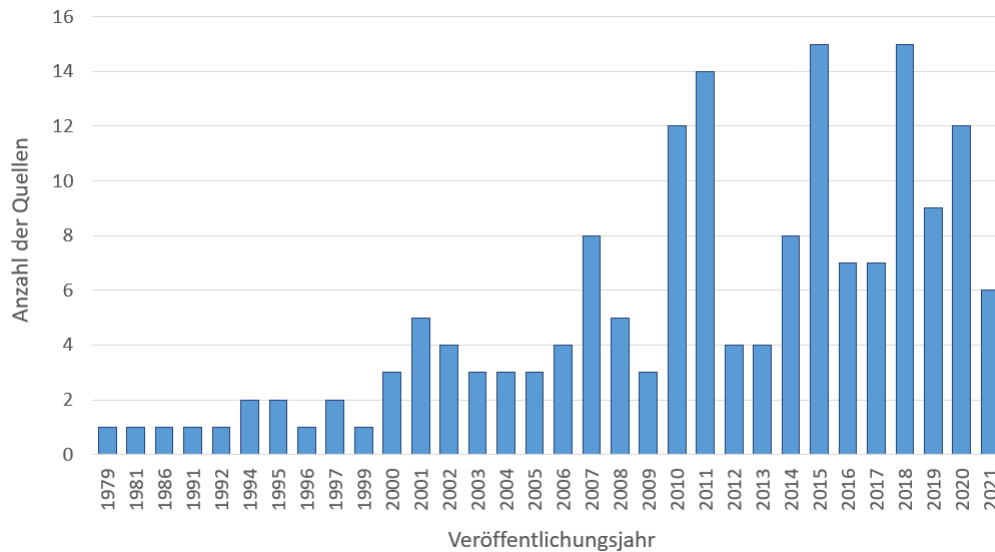


Abbildung 4.3: Anzahl der Quellen nach Veröffentlichungsjahr (eigene Darstellung).

die Spanne von mehr als 50 Jahren zwischen der ältesten Quelle und der neuesten Quelle aufgrund der zufälligen Auswahl groß. Die älteren Quellen vor dem Jahr 2000 spielen mit ungefähr 8 % der Gesamtheit jedoch eine untergeordnete Rolle.

Wird die Verteilung der Faults, wie nach der ersten Iteration, betrachtet, zeigt diese zunächst eine noch größere Diskrepanz zwischen Faults in der Cyber-Ebene und der physischen Ebene. Faults der letzteren Ebene machen nun rund 84 % aller Faults aus. Auch bei näherer Untersuchung dieser Faults zeigt sich eine Verschiebung. Die Faults, welche auf die Umspannung zurückzuführen sind, wie Fehler in Transformatoren oder Umspannwerken, bilden nun die größte Gruppe spezifischer Faults mit 29 Vorkommnissen. Die nächst größte Gruppe sind Faults im Übertragungssystem eines CPES mit 21 gefundenen Faults. Kurzschlüsse bilden eine neue Gruppe, welche vorher zu „Allgemein“ gezählt worden sind, da diese Gruppe einen gewichtigen Teil der Faults ausmacht. Hierzu zählen symmetrische und asymmetrische Faults, wie Phase-zu-Phase Faults oder Phase-zu-Grund Faults.

4.3.1 Anmerkungen

Es konnten einige grundlegende Erkenntnisse aus der durchgeführten systematischen Literaturrecherche gewonnen werden. Allgemein kann festgestellt werden, dass die Faults, die in den gefundenen Quellen benannt werden, eher allgemein beschrieben wurden. Dies wird anhand der gefundenen Faults deutlich, da häufige pauschale Bezeichnung, wie Transport-, Verteilungskabel oder allgemein Kabel-Faults, beschrieben werden. Häufig werden nur feh-

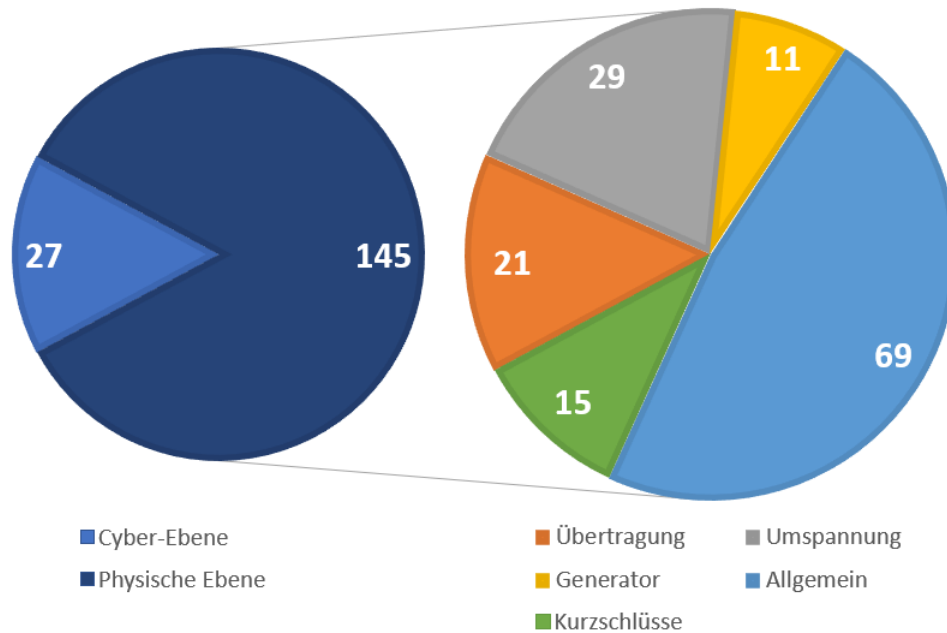


Abbildung 4.4: Verteilung der Faults nach der zweiten Iteration nach Ebene und Bezug (eigene Darstellung).

lerhafte Komponenten benannt, jedoch nicht die eigentlichen Faults. Dies ist wahrscheinlich auf die unterschiedlichen Abstraktionsebenen zurückzuführen, die für die jeweiligen Quellen relevant sind. Liegt der Schwerpunkt auf der Lokalisation eines Faults innerhalb des Netzes, ist es nicht notwendigerweise nötig den Fault konkret bis ins Detail zu beschreiben oder zu benennen, da lediglich die Funktionsfähigkeit der ganzen Komponente relevant für die Betrachtung des Problems ist. Auch die Thematik der Quelle und aus welchem Blickpunkt das Problem betrachtet wird, haben Einfluss auf den Detailgrad mit der ein Fault in der jeweiligen Arbeit genannt wird. Ist eine Quelle aus dem Blickpunkt der Informatik aus geschrieben, sind die Faults oft oberflächlicher dargestellt. Außerdem war auffällig, dass Faults, welche spezifischer beschrieben sind, eher zu Faults führen, welche ebenfalls spezifischer beschrieben wurden. Beispielsweise wurde bei der Untersuchung der Fehlfunktion von Transformator-Windungen weitere Transformator spezifische Faults gefunden, wie die Beschädigung des Transformator-kerns oder Fehlfunktion der Transformator-kühlung.

5

Taxonomie der Faults

Die Kategorisierung von Faults kann sich, wie in [Abschnitt 3.2](#) beschrieben, je nach Ausgangspunkt und Ziel stark voneinander unterscheiden. Aus diesem Grund ist es notwendig diese Ziele zunächst festzulegen. Bei der Erarbeitung der Kategorisierung im Rahmen dieser Arbeit soll eine allgemeine Zuordnung von Faults im Vordergrund stehen. Neben grundlegenden Eigenschaften, wie Lokalisation und Ursachen, sollen auch Eigenschaften berücksichtigt werden, die direkten Bezug zur Energiedomäne haben. Dabei soll diese möglichst generisch sein, um jegliche Arten von Faults, die in CPES auftreten können, einzuordnen. Die Festlegung der Kriterien wurde in [Abschnitt 5.1](#) näher beschrieben. In dem folgenden [Abschnitt 5.2](#) wurden zur exemplarischen Einordnung Faults formuliert, welche anschließend in die vorher definierten Kategorien eingeordnet.

5.1 FESTLEGUNG DER KRITERIEN

Bei der Auswahl der Kategorien wurde die Arbeit von Laprie et al. „Dependability and Its Threats: A Taxonomy“ [94] als Ausgangspunkt verwendet. Diese Kategorisierung, die in der Arbeit beschrieben worden ist, ordnet Softwarefehler bestimmten elementaren Faults zu, um diese zu kategorisieren. Vier der ursprünglich acht elementaren Faults wurden von Laprie et al. übernommen. Folgend werden diese aufgelistet und deren Eigenschaften kurz erklärt:

Phänomenologische Ursache:

- Natürlich: Ursache des Faults sind Umwelteinflüsse.
- Anthropogen: Ursache des Faults ist menschengemacht.

Intention:

- Schädliche Absicht: Fault wurde mit der Absicht herbeigeführt die Funktionsfähigkeit zu beeinträchtigen.
- Nicht-Schädliche Absicht: Fault wurde unabsichtlich herbeigeführt.

Persistenz:

- Permanent: Fault bleibt bis zur Behebung bestehen.
- Transient: Fault tritt nur vorübergehend auf.

Systemgrenze:

- Intern: Fault wird durch ein Ereignis innerhalb des Systems hervorgerufen.
- Extern: Fault wird durch ein Ereignis außerhalb des Systems hervorgerufen.

Zu diesen elementaren Faults von Laprie et al. wurden vier weitere elementare Faults formuliert, die speziell im Zusammenhang mit der Energiedomäne stehen. Nachfolgend werden auch diese mit ihren Eigenschaften beschrieben:

Domain:

- **Netz-Ebene:**
 - Übertragung: Ursache liegt innerhalb des Transportweges.
 - Umspannwerk: Ursache liegt innerhalb eines Umspannwerkes.
 - Erzeugung: Ursache liegt auf Seite der Energieerzeugung.
 - Verbrauch: Ursache liegt auf der Seite des Energieverbrauchers.
- **Cyber-Ebene:**
 - Software: Ursache liegt innerhalb eines Softwaresystems.
 - Hardware: Ursache liegt innerhalb einer Hardwarekomponente.
 - Datenübertragung: Ursache liegt innerhalb der Datenübertragung.

Spannungsebene:

- Höchstspannungsebene: Lokalisation liegt innerhalb des Höchstspannungsnetzes.
- Hochspannungsebene: Lokalisation liegt innerhalb des Hochspannungsnetzes.
- Mittelspannungsebene: Lokalisation liegt innerhalb der Mittelspannungsebene.
- Niederspannungsebene: Lokalisation liegt innerhalb der Niederspannungsebene.

Beeinträchtigung:

- Vollständig: Vollständiger Funktionsverlust der betroffenen Komponente.
- Partiiell: Eingeschränkte Funktion der betroffenen Komponente.

Netzauswirkung:

- Global: Fault beeinträchtigt die Funktionsfähigkeit des gesamten Netzes.
- Lokal: Fault beeinträchtigt einen Teil des Netzes.

Die Eigenschaften der elementaren Faults müssen sich dabei nicht gegenseitig ausschließen. Dies ist je nach Fault auch nicht möglich, da nicht näher beschriebene generische Faults, wie Überladung oder Überhitzung, in vielen Komponenten vorkommen und auch mehrere Eigenschaften eines elementaren Faults besitzen können. Aus diesem Grund ist auch nicht immer eine distinkte Zuordnung möglich.

5.2 EINORDNUNG VON FAULTS

Als exemplarische Kategorisierung von Faults, anhand der in dieser Arbeit erarbeiteten Taxonomie, werden folgende eigens formulierte Faults in [Tabelle 5.1](#) kategorisiert:

Fault 1:

Vereisung einer Schaltanlage in einem Umspannwerk, verursacht durch kalte Wetterlage.

Fault 2:

Unterbrochene Niederspannungsoberleitung, verursacht durch einen Baumsturz während eines Unwetters.

Fault 3:

Unterbrochene Niederspannungsoberleitung, verursacht durch einen Baumsturz im Zuge von Flurbereinigungsmaßnahmen.

Fault 4:

Beschädigter Transformator, verursacht durch einen Unfall bei Instandhaltungsmaßnahmen.

Fault 5:

Ausfall von Sensoren, verursacht durch einen Cyber-Angriff auf die Systemsoftware.

Fault 6:

Zerstörung eines Smart Meters, verursacht durch einen physischen Angriff.

Fault 7:

Abschaltung eines Kraftwerks, bedingt durch den Ausfall der Systemsoftware, verursacht durch einen internen Softwarefehler.

Fault 8:

Beschränkung der Drehzahl eines Windrades aufgrund hoher Windgeschwindigkeiten.

Fault 9:

Dysfunktion eines Aktuators, verursacht durch fehlerhafte Datenübertragung.

Fault 10:

Ausfall einer Leitung, verursacht durch einen Kurzschluss.

Wird die Einordnung der Faults betrachtet, fällt auf, dass, je detaillierter die Faults beschrieben worden sind, desto genauer konnten diese kategorisiert werden. Beispielsweise enthält die Beschreibung des Faults 2 alle wesentlichen Informationen, um den Fault genau einer Eigenschaft eines elementaren Faults zu zuordnen. Gegenteilig zu Fault 2 ist der Fault 10 bei dem wenig Informationen bekannt sind, wodurch die Kategorisierung nicht eindeutig vorgenommen werden kann. In diesem Fall werden alle Eigenschaften eines elementaren Faults angekreuzt, da der Fault tendenziell auch jede Eigenschaft besitzen kann. Jedoch lassen sich durch die Beschreibungen auch Rückschlüsse auf Eigenschaften schließen, welche nicht direkt beschrieben worden sind. So kann bei Fault 6 und 8 davon ausgegangen werden, dass der Ausfall eines Smart Meters maximal Auswirkungen auf die NS-Ebene hat. Dies verhält sich für die anderen elementaren Faults ähnlich, da die Eigenschaften oft zwar nicht konkret beschrieben sind, sich aber aus dem Kontext ergeben. So kann beispielsweise bei Ausfällen, welche durch Angriffe induziert worden sind, immer davon ausgegangen werden, dass diese auch mit einer schadhafte Absicht hervorgerufen worden sind und von außerhalb der Systemgrenzen verursacht wurden.

Elementarer Fault	Eigenschaft	Fault 1	Fault 2	Fault 3	Fault 4	Fault 5	Fault 6	Fault 7	Fault 8	Fault 9	Fault 10
Domain	Übertragung Umspannwerk Erzeuger-Seite Verbraucher-Seite	x	x	x	x			x	x		x
	Cyber Hardware Software Datenübertragung					x	x	x		x	
Phenomenologische Ursache	Natürlich Anthropogen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Schädliche Absicht Nicht-Schädliche Absicht	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Systemgrenze	Intern										
	Extern	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Persistenz	Permanent										
	Transient	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Netzauswirkung	Lokal	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Global	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Beeinträchtigung	Vollständig	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Partiell										
Spannungsebene	Höchstspannungsebene	x			x	x		x		x	x
	Hochspannungsebene	x			x	x		x		x	x
	Mittelspannungsebene	x			x	x		x		x	x
	Niedrigspannungsebene	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabelle 5.1: Einordnung von Faults anhand der vorgestellten Taxonomie.

6

Anforderungen an die Simulation

Für die Modellierung eines Energienetzes und die Einbettung von Faults werden zunächst einige Anforderungen an das zu erstellende System gestellt. Diese werden in diesem Kapitel für die weitere Bearbeitung der Forschungsfrage aufgestellt. Die Funktionalitäten werden zwischen Muss-Anforderungen und Soll-Anforderungen unterschieden. Die Muss-Anforderungen stellen die Kernfunktionen der Implementierung dar, ohne die eine sinnvolle Umsetzung nicht möglich ist und werden in [Abschnitt 6.1](#) aufgestellt. Die Soll-Funktionen in [Abschnitt 6.2](#), sind hingegen optional und erweitern den Funktionsumfang.

6.1 MUSS-ANFORDERUNGEN

In der folgenden [Tabelle 6.1](#) sind die funktionalen Muss-Anforderung aufgelistet. Diese werden durch eine Kennung (M-XX), einer kurzen Bezeichnung und eine Beschreibung in der Tabelle dargelegt. Diese Anforderungen müssen erfüllt sein, damit das Modell und der Datensatz zur Untersuchung der [Forschungsfrage 2](#) beitragen kann. Dadurch resultieren diese Anforderungen direkt aus Forschungsfrage.

Kennung	Bezeichnung	Beschreibung
M-01	Modellierung wesentlicher Netzkomponenten	Das System muss in der Lage sein, alle wesentlichen Komponenten eines Energienetzes abzubilden.
M-02	Abbildung eines Energienetzes	Das System muss in der Lage sein, ein Energienetz abzubilden.
M-03	Simulation eines Zeitraumes	Das System muss in der Lage sein, einen Zeitraum simulieren zu können.
M-04	Modellierung von Faults	Das System soll in der Lage sein, Faults einbetten und simulieren zu können.
M-05	Exportierbarkeit als Datensatz	Das System muss in der Lage sein, die erzeugten Daten als Datensatz exportieren zu können.

Tabelle 6.1: Funktionale Muss-Anforderungen.

6.2 SOLL-ANFORDERUNGEN

In der folgenden [Tabelle 6.2](#) sind die funktionalen Soll-Anforderung aufgelistet. Diese werden, wie auch die Muss-Anforderungen, durch eine Kennung (S-XX), einer kurzen Bezeichnung und eine Beschreibung in der Tabelle dargelegt. Die Erhebung der Soll-Anforderungen stellt zum einen eine Vertiefung der Muss-Anforderungen dar, indem die Faults differenzierter betrachtet werden und zum anderen stellen diese Verbesserungen die das System enthalten sollte. Diese Anforderungen müssen nicht zwingend umgesetzt werden, da sie nur bedingt zur Erarbeitung der [Forschungsfrage 2](#) beitragen.

Kennung	Bezeichnung	Beschreibung
S-01	Auswahl des simulierten Zeitraumes	Das System soll die Möglichkeit bieten, den simulierten Zeitraum frei zu wählen.
S-02	Abbildung verschiedener Spannungsebenen	Das System soll die Möglichkeit bieten, verschiedene Spannungsebenen abbilden zu können.
S-03	Modellierung verschiedener Lasterzeuger	Das System soll die Möglichkeit bieten, unterschiedliche Lasterzeuger darzustellen.
S-04	Modellierung verschiedener Erzeuger	Das System soll die Möglichkeit bieten, unterschiedliche Energieerzeuger darzustellen.
S-05	Modellierung von Faults in Transformatoren	Das System soll es ermöglichen, Faults in Transformatoren einzubetten.
S-06	Modellierung von Faults in der Übertragung	Das System soll es ermöglichen, Faults in Übertragungsleitung einzubetten.
S-07	Modellierung von Faults auf Erzeuger-Seite	Das System soll es ermöglichen, Faults auf der Erzeuger-Seite einzubetten.
S-08	Modellierung von Faults in Verbraucher-Seite	Das System soll es ermöglichen, Faults auf der Verbraucher-Seite einzubetten
S-09	Modellierung von Faults in Umspannwerken	Das System soll es ermöglichen, Faults in Umspannwerken einzubetten.
S-10	Modellierung von Faults auf der Cyberebene	Das System soll es ermöglichen, Faults auf der Cyber-Ebene einzubetten.
S-11	Simulation von unterschiedlichen Zeitintervallen	Das System soll die Möglichkeit bieten, unterschiedliche Zeitintervalle zu simulieren.
S-12	Verschiedene Zeitpunkte zur Faultinduzierung	Das System soll es ermöglichen, Faults zu unterschiedlichen Zeitpunkten einzubetten.
S-13	Randomisierte Auswahl von Faults	Das System soll die Möglichkeit bieten, zufällig gewählte Faults einzubetten.

S-14	Randomisierte Auswahl eines Zeitintervalls	Das System soll die Möglichkeit bieten, zufällig gewählte Zeiträume zu wählen in denen ein Fault eingebettet ist.
S-15	Bereitstellung von gelabelten Daten	Das System soll es ermöglichen, Daten zu labeln und zu speichern, ob diese während des Faults aufgetreten sind.
S-16	Verwendung realistischer Erzeugungsprofile	Das System soll in der Lage sein, realistische Erzeugungsprofile für die Energie einspeisenden Komponenten zu verwenden.
S-17	Verwendung realistischer Lastprofile	Das System muss in der Lage sein, realistische Lastprofile für die Last erzeugenden Komponenten zu verwenden.

Tabelle 6.2: Funktionale Soll-Anforderungen.

7 | Konzeption

Bei der Betrachtung der Anforderungen aus [Kapitel 6](#) wird deutlich, dass die Modellierung eines Energienetzes und Implementierung der unterschiedlichen Faults nicht durch eine GUI-basierte Simulationsumgebung realisiert werden kann. Dies liegt darin begründet, dass diese zumeist nur den Stromfluss eines funktionierenden Netzes simulieren und nicht die Möglichkeit bietet eine Vielzahl von Faults in das System einzubetten. Deshalb ist es notwendig ein Energienetz zu erstellen, welches eine Vielzahl an Faults implementiert. Die Zielsetzung ist, auf Grundlage eines modellierten Netz, welches realitätsnah ein **MS**-Netz mit angebotenen **NS**-Netzen abbildet, Faults einzubetten, um die Funktionsweise des Netzes zu beeinflussen. Durch diese **SE** können verschiedene Verbraucher, wie Haushalte oder Betriebe, sowie unterschiedliche Distributed Energy Resources (**DER**) dargestellt werden. Außerdem bieten diese **SE** auch unterschiedliche Topologien, wodurch der selbe Fault unterschiedliche Auswirkungen aufweisen kann, je nachdem auf welcher **SE** er auftritt. Die bei der Simulation erzeugten Daten sollen folglich als Datensatz gespeichert werden, um die Auswirkungen von Faults auf das Netz analysieren zu können und die Möglichkeit zu bieten, Fault Detection Methoden zu trainieren oder zu evaluieren. Auch können die Daten für die Erarbeitung zur Fehlerbehandlung der verschiedenen Faults verwendet werden, um die Beeinträchtigung des Netzes nach dem Auftreten zu kompensieren.



Abbildung 7.1: Komponenten der Konzeption (eigene Darstellung).

Die in [Abbildung 7.1](#) dargestellten Kernkomponenten bauen jeweils aufeinander auf, sodass zunächst ein Netzmodell erstellt oder genutzt werden muss, welches die Bestandteile und Merkmale eines **MS**-Netzes aufweist und mit dessen Hilfe ein Stromfluss beziehungsweise die Funktionsweise eines Netzes simuliert werden kann. Die zweite Kernkomponente bildet den Schwerpunkt des Konzeptes. Hierbei werden Faults, welche innerhalb des Netzes in dessen Bestandteile auftreten können, in das Modell eingebettet. Dadurch wird eine Veränderung der Funktionsweise des Netzes erzeugt. Als letzte Kernkomponente wird die Portierung der Daten realisiert, wodurch das zuvor erstellte Netz mit den eingebetteten Faults als Datensatz in einem versatilem Format gespeichert wird.

7.1 MODELLIERUNG EINES ENERGIE NETZES

Bei der Erstellung des Netzmodells und der Modellierung müssen Eigenschaften vorhanden sein, die in [Tabelle 7.1](#) aufgelistet wurden, welche für die Erfüllung der Anforderungen benötigt werden. Mit Hilfe einer Simulationssoftware können diese Eigenschaften modelliert werden.

Aus den Anforderungen geht hervor, dass ein Netz modelliert werden soll, welches möglichst realitätsnah ist und verschiedenen Verbraucher wie auch Erzeuger integriert. Hierfür bietet ein **MS**-Netz eine gute Ausgangslage, da neben Großverbrauchern und Erzeugern auch **NS**-Netze angebunden sein können, welche weitere Verbraucher und Erzeuger abbilden können. Dieses steht dabei in Abhängigkeit zu einem Netz höherer **SE**, wie einem **HS**-Netz. Durch einen Transformator in einem Umspannwerk, welcher die Spannung des **HS**-Netzes von 100 kV auf die der **MS** von 5 kV bis 50 kV herunterwandelt, wird die Spannungshaltung gewährleistet und das **MS**-Netz, welches überwiegend als ein Verbrauchernetz betrieben wird, mit ausreichend Energie versorgt. Ausgehend von diesem Knoten wird das **MS**-Netz modelliert. Hierfür werden Übertragungsleitungen als Kanten abgebildet, welche wiederum Knoten miteinander verbinden. Die Komponenten weisen für sie typische Eigenschaften auf. So haben Übertragungsleitungen Eigenschaften wie Länge, Widerstand und Auslastung. Die Knoten hingegen binden verschiedene Komponenten, wie Verbraucher, Erzeuger, Speicher oder auch andere Netze durch Transformatoren an das **MS**-Netz an. Bei der Modellierung der Verbraucher soll es möglich sein, diese bestimmten Lasterzeugern zuzuordnen, beispielsweise Großverbrauchern auf **MS**-Ebenes sowie Elektro-Fahrzeugen oder Wärmepumpen auf **NS**-Ebene. Außerdem sollen sich diese wie reale Verbraucher verhalten. Dies kann durch eine explizit abgebildet werden oder als generische Modellierung, welche mit Hilfe von Lastprofilen die Last der Komponente steuert. Das Verhalten der Energieerzeuger und Speicher wird auf die gleiche Art modelliert, wohingegen Energie in das Netz eingespeist wird. Ebenso können Knoten auf der **MS**-Ebene als Ankerpunkt für ein durch einen Transformatoren angebundenes **NS**-Netz dienen. Der Transformator wandelt die entsprechende **MS** dann auf die **NS** von ≤ 1 kV um. Die in dem **NS**-Netz vorkommenden Komponenten ähneln sich grundsätzlich mit denen in einem **MS**-Netz. Jedoch werden **MS**-Netze in der Regel als Ringnetz betrieben und **NS**-Netze typischerweise als Sternnetz oder Strahlennetz. [17] Außerdem müssen Schaltanlagen vorhanden sein, mit dessen Hilfe der Stromfluss verändert werden kann. Diese Schaltungen können entweder am Beginn oder Ende von Kanten oder aber sich an Ein- und Ausgängen von Knoten befinden. Dadurch können einzelne Subnetze vom Netz getrennt werden oder die Fließrichtung des Stroms verändert werden.

[Abbildung 7.2](#) zeigt eine beispielhafte schematische Darstellung eines Netzes, wie es in diesem Konzept formuliert worden ist. Anhand der Darstellung sind die unterschiedlichen Topologien der **SE** zu erkennen und das einzelne Knoten, neben der für sie normalen Last, ebenfalls weitere Komponenten angebunden haben, welche sich auf die Last auswirken. Neben der Modellierung des Netzes muss auch eine Simulation über einen Zeitraum möglich sein, damit das Netz als Grundlage für die folgenden Kernkomponenten aus [Abbildung 7.1](#) dienen kann. Um dies zu realisieren soll das Netz für jede Sekunde eines Zeitraumes mit realistischen Lasten und Einspeisungen simuliert werden, sodass für jeden Zeitpunkt innerhalb des gegebenen Zeitintervalls Daten des Netzes zur Verfügung stehen und dieses auch zu jedem Zeitpunkt verändert werden kann. Durch die Modellierung einer endlosen Simulation können Faults ebenfalls eingebettet werden, dann ist es jedoch notwendig

Netzeigenschaft	Beschreibung
Allgemein	
Lastprofile	Realistische Profile nachdem die Lasten der angebundenen Verbraucher erzeugt bzw. errechnet werden können.
Erzeugungsprofile	Realistische Profile nachdem die Einspeisung der angebundenen Erzeuger und Speicher erzeugt werden kann.
Zeitreihen	Der Stromfluss innerhalb des Netzes wird über einen definierten Zeitraum simuliert.
Veränderbarkeit der Komponenten	Die Komponenten des Netzes sind zur Laufzeit veränderbar.
Mittelspannungsebene	
Anbindung an externes Netz	Gewährleistet die Stromversorgung und Spannungshaltung durch übergeordnetes Netz.
Spannungswandlung	Ermöglicht die Wandlung mit Hilfe von Transformatoren von Hochspannung (100 kV) zu Mittelspannung (5 kV bis 50 kV).
Knoten	Dienen zur Anbindung von Großverbrauchern, -erzeugern und NS-Netzen über Transformatoren.
Schaltanlagen	Dienen zu Kontrolle des Stromflusses vor und nach einem Knoten.
Kanten	Dienen zur Übertragung von Strom zwischen den Knoten.
Ringtopologie	Teilnetze bilden typischerweise Ringstrukturen.
Niederspannungsebene	
Anbindung über MS-Knoten	Gewährleistet die Stromversorgung und Spannungshaltung durch übergeordnetes Netz.
Spannungswandlung	Ermöglicht die Wandlung mit Hilfe von Transformatoren von Mittelspannung (5 kV bis 50 kV) zu Niederspannung (≤ 1) kV.
Knoten	Dienen zur Anbindung von Endverbrauchern und DER.
Schaltanlagen	Dienen zu Kontrolle des Stromflusses vor und nach einem Knoten.
Kanten	Dienen zur Übertragung von Strom zwischen den Knoten.
Sterntopologie	Teilnetze bilden typischerweise Sternstrukturen.

Tabelle 7.1: Netzeigenschaften des konzeptionellen Netzmodells.

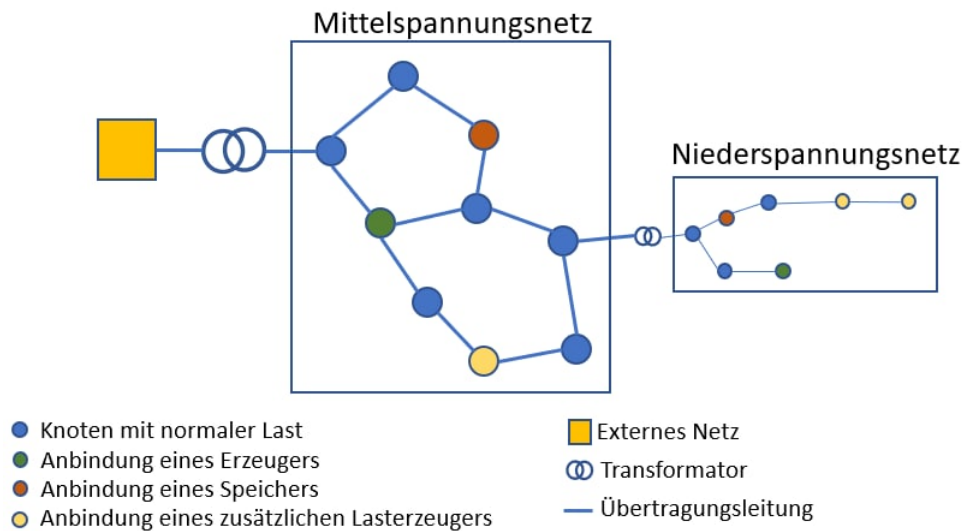


Abbildung 7.2: Beispielhafte schematische Darstellung eines MS-Netzes (eigene Darstellung).

ein Zeitintervall zu wählen, welches dazu dient den Start und Endpunkt der Datenspeicherung festzulegen. Zudem müsste das simulierte Netz ermöglichen Daten bereitzustellen, welche das Über- oder Unterschreiten von Schwellenwerte aufzeichnet, sodass erkannt werden kann, ob Komponenten beeinträchtigt wurden. Für eine möglich realitätsnahe Modellierung sollte das Netz auch über die entsprechende Größenordnung eines realen Netzes verfügen und möglichst reale Verteilungen von Verbrauchern und DER besitzen.

7.2 EINBETTUNG DER FAULTS

Die Einbettung von Faults stellt die zentrale Kernkomponente dieses Konzeptes dar. Dabei ist die Auswahl der Faults, welche berücksichtigt werden, nicht davon abhängig, ob diese die Kategorien abdecken, die in Kapitel 5 formuliert wurden. Bei der Auswahl wird lediglich die Umsetzbarkeit in Betracht gezogen, sodass ein Fault sinnvoll in die Simulation eingebettet werden kann. Die Einbettung eines Faults kann während der Simulation durch unterschiedliche Anpassungen verändert werden. Neben dem Zeitpunkt der Einbettung spielt auch die Dauer und die Reaktion des Netzes eine Rolle bei der Modellierung.

Die Abbildung 7.3 stellt den Verlauf einer Simulation einer Zeitreihe als Ablauf dar, die einen Fault zu einem bestimmten Zeitpunkt in des Netz induziert. Die Modifikation des Netzes durch die Veränderung einer Komponente, welche durch die Einbettung eines Faults angepasst wurde, wird bei allen folgenden Simulationsiterationen angewandt. In Abbildung 7.4 wird dieses veranschaulicht dargestellt. Der Zeitpunkt der Einbettung stellt einen wichtigen Aspekt bei der Modellierung von Netzen mit Faults dar, sodass dieser frei in dem simuliertem Zeitraum wählbar sein sollte.

Da es nicht nur Faults gibt, die über den gesamten restlichen Zeitraum nach der Einbettung

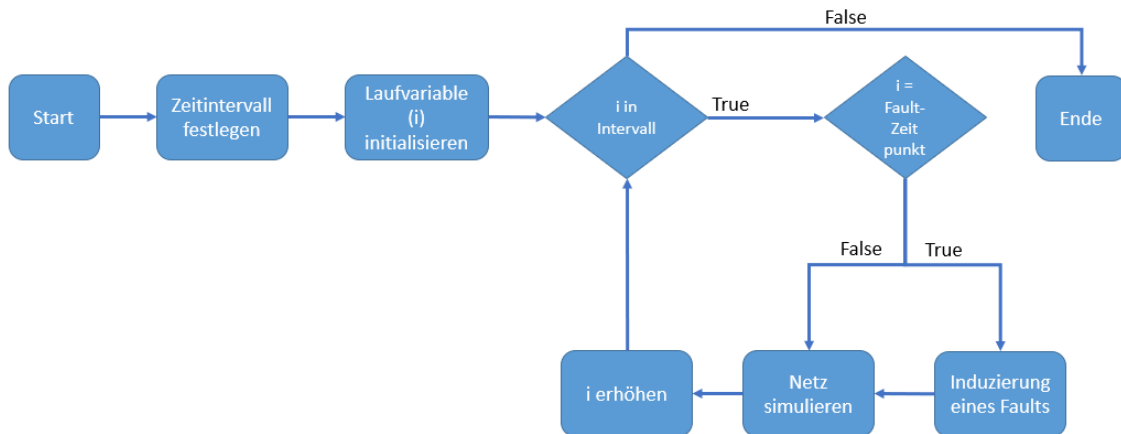


Abbildung 7.3: Ablauf der Simulation eines Zeitintervalls und der Einbettung eines Faults (eigene Darstellung).

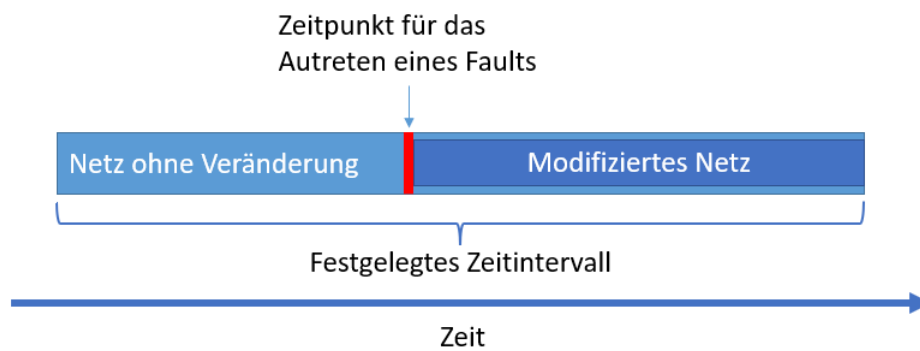


Abbildung 7.4: Visualisierung des zeitlichen Ablaufs einer Simulation mit der Einbettung eines Faults (eigene Darstellung).

das Netz modifizieren, ist es notwendig auch den Zeitraum begrenzen zu können, in dem der Fault das Netz beeinflusst. Beispielsweise kann eine zerstörte Übertragungsleitung zwar zu einer Modifikation des Netzes führen der das gesamte restliche Zeitintervall abdeckt, ebenso kann es aber auch vorkommen, dass diese Komponente in der Realität wieder repariert wird, sodass das Netz wieder den Zustand vor dem Auftreten des Faults annimmt. Um solch einen Fall und um transiente Faults im Allgemeinen modellieren zu können, wird es ermöglicht den Zustand vor der Einbettung eines Faults wiederherzustellen und das Netz wieder im vorherigen Zustand zu simulieren. [Abbildung 7.5](#) zeigt die Veränderung des Netzes und der Reversion des Faults an einem bestimmten Zeitpunkt.

Neben der Einbettung von Faults zu bestimmten Zeitpunkten und Intervallen müssen auch Maßnahmen berücksichtigt und modelliert werden, welche die Auswirkungen eines Faults verändern, da Realsysteme auch Automatismen bieten, welche Faults abfedern. So kann nach der Einbettung eines Faults, der zum Ausfall einer Übertragungsleitung führt, der Stromfluss durch die Schließung

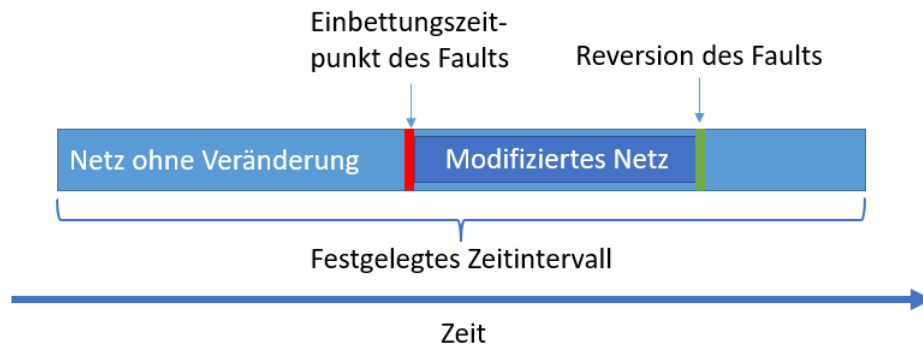


Abbildung 7.5: Visualisierung des zeitlichen Ablaufs einer Simulation mit der Einbettung eines Faults und dessen Reversion (eigene Darstellung).

einer Schaltanlage verändert werden, um das Teilnetz wieder mit Strom versorgen zu können, welches zuvor gegebenenfalls vom Stromnetz abgeschnitten wurde. Diese Modifikation kann wiederum zum gleichen Zeitpunkt der Einbettung in das Netz integriert werden oder zu einem Zeitpunkt währenddessen der Fault auftritt. Neben den formulierten Rahmenbedingungen des Zeitpunktes, Zeitraumes und Reaktion des Netzes spielen die zu modellierenden Faults eine ebenso gewichtige Rolle. Die Umsetzung der Einbettung verändert sich durch die Charakteristik eines Faults. Dadurch können einige Faults besser modelliert werden als andere. Beispielsweise ist die Einbettung von Faults innerhalb von Komponenten durch das Anpassen von Variablen, welche die Funktionalität der Komponente beeinflussen können, mit wenig Aufwand umsetzbar. Aufwändiger ist jedoch die Umsetzung von Faults, welche nur indirekt Auswirkungen in dem modelliertem Netz haben, wie ein Fehler der Kontrollsoftware, die das Schließen einer Schaltanlage verhindert. Aus diesem Grund muss die Einbettung eines jeden Faults einzeln betrachtet und umgesetzt werden.

7.3 EXPORTIERUNG DES NETZES

Die Exportierung des Netzes als Datensatz stellt die letzte der drei Kernkomponenten des Konzeptes dar. Hierfür werden die Daten, welche sich aus der Simulation des modellierten Netzes und des eingebetteten Faults ergeben, über den simulierten Zeitraum gespeichert und als Datensatz bereitgestellt. Dieser Datensatz soll das Netz sowie die Veränderung des Netzes zu jedem Zeitschritt des Zeitintervalls beinhalten. Der dadurch zur Verfügung gestellte Datensatz soll zudem für weitere Simulationsumgebungen lesbar und importierbar sein.

8

Implementierung

Die folglich beschriebene Implementierung wurde ausgehend von dem in [Kapitel 7](#) formulierten Konzept umgesetzt. Hierbei wird zunächst die Umsetzung der Modellierung des Netzes und anschließend die Einbettung der Faults beschrieben. Für die Implementierung wurden verschiedene Technologien verwendet, um die Anforderungen aus [Kapitel 6](#) zu erfüllen. Neben den bereits in [Abschnitt 2.5](#) erwähnten Technologien *pandapower* [82] und *simBench* [13] wurde auch *Python* als Programmiersprache, *Jupyter Notebooks* [181] zu vereinfachten Ausführung und *Visual Studio Code* [182] als Programmierumgebung verwendet. *Pandapower* wurde neben den in [Abschnitt 2.5](#) genannten Gründen als Simulationsframework verwendet, da es die Möglichkeit bietet Eigenschaften von Netzkomponenten zu verändern, Zeitreihen zu simulieren und Netze aus *simBench*-Datensätzen [183] zu importieren. [82]

8.1 MODELLIERUNG IN PANDAPOWER

Zur Vereinfachung der Modellierung eines Netzes, wurde für die Umsetzung in *pandapower* ein von *simBench* bereitgestellter Datensatz verwendet. Die Verwendung des Datensatzes erfolgt deswegen, da dieser neben einem **MS**-Netz auch eine Vielzahl **NS**-Netzen abbildet. Ebenso sind bereits unterschiedliche Erzeuger und Verbraucher in dem Netz vorhanden. Die *simBench*-Datensätze enthalten zudem bereits die benötigten Komponenten, wie auch deren Konfiguration, sodass die importierten Netze von *simBench* keine weitere Anpassung benötigen und direkt verwendet werden können. Zudem enthalten die Datensätze auch bereits Last- und Erzeugerprofile, die circa ein Jahr abdecken und anhand echter Daten erstellt worden sind, wodurch eine realitätsgetreue Simulation einfach umzusetzen ist.

Der gewählte Datensatz „1-MVLV-semiurb-all-1-sw“ [183] bildet ein vorstädtisches **MS**-Netz mit allen angebotenen **NS**-Netzen, sowie Schaltanlagen an jedem Knoten ab.

[Abbildung 8.1](#) zeigt das importierte Netz auf der **MS**-Ebene mit den entsprechenden Knoten, die in *pandapower* als Bus bezeichnet werden, Busnummern und Kanten, welche Übertragungsleitungen darstellen. Das Netz besitzt 9104 Busse die über 8998 Leitungen verbunden sind. Es sind zudem 1108 statische Generatoren an das Netz angebunden, dadurch werden beispielsweise **DER**, wie Windanlagen und Photovoltaikanlagen, abgebildet. Die dabei erzeugte Energie wird durch vorher festgelegte Profile realitätsgetreu in das Netz eingespeist. Hierbei werden auch die Jahreszeiten und Tageszeiten berücksichtigt, wenn entsprechende Zeiträume simuliert werden. Ebenso wird die Last, welche in den einzelnen Bussen erzeugt wird, durch solche Profile simuliert. Diese Profile werden als Teil des *simBench*-Datensatzes importiert und dem Netz bereitgestellt.

Neben weiteren Komponenten, die in [Tabelle 8.1](#) zu sehen sind, sind auch 112 Transformatoren

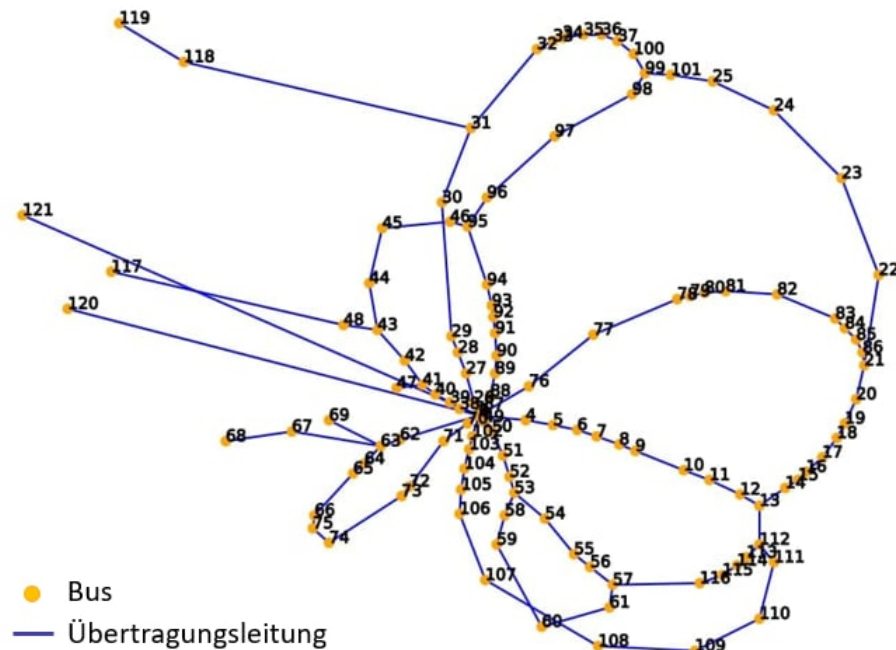


Abbildung 8.1: Mittelspannungsebene des verwendeten Modellnetzes (eigene Darstellung).

angeschlossen, welche in der Regel ein **NS**-Netz über einen **MS**-Bus an das Netz anbinden. Durch die Verwendung eines Netzes, welches durch ein `simBench`-Datensatz importiert wurde, und die Verwendung der bereitgestellten Profile des Datensatzes ist das grundlegende Modell für die weitere Simulation bereitgestellt.

8.2 FAULT-EINBETTUNG

Für die Einbettung von Faults muss das Netz beziehungsweise der Stromfluss über einen Zeitraum simuliert werden, um die Auswirkungen des induzierten Faults sichtbar und messbar zu machen. Hierfür hätte die in `pandapower` vorhandene Funktion zur Simulierung von Zeitreihen nur bedingt verwendet werden können, da diese Funktion den festgelegten Zeitraum in einem Prozess durchläuft, ohne die Möglichkeit zu bieten zwischen Zeitschritten das Netz oder eine Komponente des Netzes zu verändern. Dadurch wäre es nur möglich gewesen Faults zu implementieren, welche von Beginn an in dem Netz vorhanden sind. Allerdings wäre es möglich gewesen den gewünschten Zeitraum in weitere Intervalle zu unterteilen, sodass zunächst das Intervall vor dem Fault simuliert wird und dann die Modifikation stattfindet, um danach das restliche Intervall zu simulieren. Auf diese Weise würde der gewünschte Zeitraum auch simuliert werden können und die Einbettung eines Faults ermöglicht. Da die Komplexität durch solch eine Implementierung zunimmt, je öfter der gewählte Zeitraum in verschiedene Intervalle geteilt wird, wurde die für die Simulation der Zeitreihen zugrunde liegende Methode reimplementiert. Wie `pandapower` Zeitreihen implementiert, ist in [Abbildung A.9](#)

Bezeichnung	Anzahl
load	9799
sgen	1108
storage	546
switch	18212
ext_grid	1
line	8998
trafo	112
measurment	42
bus_geodata	9104
substation	1
loadcases	6

Tabelle 8.1: Anzahl der Netzkomponenten und anderen Daten.

im Anhang dargestellt. Durch diese Implementierung ist es möglich einen Zeitpunkt innerhalb des zu simulierenden Zeitraumes zu wählen, um das Netz beziehungsweise eine Komponente oder mehrere Komponenten zu modifizieren, um einen Fault innerhalb des simulierten Zeitraumes zu induzieren. Auch die Option mehrere Zeitpunkte zu wählen, um Modifikationen öfter während einer Simulation einer Zeitreihe vorzunehmen, wurde damit ermöglicht. Dies vereinfacht die Einbettung von Faults, welche wie in [Kapitel 7](#) beschrieben, zu einem späteren Zeitpunkt reversiert werden, sodass das Netz wieder in einen Zustand gelangt, der nicht von einem Fault beeinflusst worden ist. Die Implementierung dessen wird in [Abbildung 8.2](#) schematisch dargestellt. Die Zeitschritte in denen eine Zeitreihe simuliert wird, repräsentieren 15 Minuten, da die durch den *simBench*-Datensatz bereit gestellten Profile jeweils Daten in 15 Minuten Abständen enthalten. Neben dem Zeitpunkt in der eine Modifikation vorgenommen worden ist, kann auch der Zeitraum, der simuliert wird, frei gewählt werden. Für die Ausführung wurde ein Zeitintervall von einer Woche, respektive 672 Zeitschritten á 15 Minuten, gewählt. Außerdem wurde die Fault Reversion in der Regel nach zwei Tagen, respektive 192 Zeitschritten á 15 Minuten, vorgenommen. Dieser Zeitraum wurde gewählt, damit das Netz nach der Reversion noch eine ausreichende Zeit simuliert wird, um auch genügend Daten zu generieren, welche wieder unbeeinflusst sind. Der *simBench*-Datensatz bietet zur Simulation von Zeitreihen Profile an, welche etwas mehr als ein Jahr abdecken können. Dadurch ist der maximale Zeitraum der simuliert werden kann auf circa 34560 Zeitschritte begrenzt. [184]

Mit Hilfe der vorgenommen Implementierung der Simulation von Zeitreihen wurden insgesamt 32 Faults modelliert und implementiert. Die Auswahl der Faults wurde anhand der Variablen getroffen, die von den jeweiligen Komponenten zur Verfügung gestellt worden sind. Die Veränderung der Variablen muss dabei zu einer Veränderung des Netzes im Vergleich zum Zustand des Netzes ohne Fault führen. Die sich im Anhang befindenden Abbildungen [Abbildung A.1](#) bis [Abbildung A.8](#) zeigen die Veränderung von Kennzahlen einiger Faults. Dabei werden einige Faults auch mehrfach eingebettet, aber das Netz zugleich auch verändert, sodass unterschiedliche Auswirkungen auf das Netz erzeugt wurden. Diese Faults werden in der [Tabelle 8.2](#) aufgelistet. Die Tabelle enthält die Kennung eines Faults sowie eine kurze Beschreibung. Zudem ist der Tabelle zu entnehmen, ob ein

Fault zu einem späteren Zeitpunkt der Simulation der Zeitreihe wieder reversioniert worden ist und ob Modifikationen nach dem Induzieren eines Fault vorgenommen worden sind, um die Auswirkungen abzufedern.

Kennung	Beschreibung	Reversion	Netzanpassung
F01	Ausfall Line 2 (MS-Ebene)		
F02	Ausfall Line 2, Schaltung 237 an Bus 112 geschlossen		X
F03	Ausfall Line 2, Schaltung 243 an Bus 101 geschlossen		X
F04	Ausfall Line 2, Schaltung 237 und 243 an Bus 101 bzw. 112 geschlossen		X
F05	Erhöhung Resistenz auf 82 und Reaktanz 40 der Line 2		
F06	Erhöhung Resistenz auf 82 und Reaktanz 40 der Line 2		
F07	Erhöhung der Resistenz auf 92 (Maximalwert) der Line 2		
F08	Erhöhung der Resistenz auf 10 der Line 2		
F09	Erhöhung der Reaktanz auf 144 (Maximalwert) der Line 2		
F10	Erhöhung der Reaktanz auf 5 der Line 2		
F11	Verringerung der Resistenz und Reaktanz 0,0001 der Line 2		
F12	Erhöhung der Kapazität auf 1000000 der Line 2.		
F13	Erhöhung der Kapazität auf 25000 der Line 2.		
F14	Erhöhung der dielektrischen Konduktivität auf 6000 der Line 2		
F15	Verringerung der Thermal-Spannung von 0,22 auf 0,1 der Line 2		
F16	Erhöhung der maximalen I-KA von 0,252 auf 2000 der Line 2		
F17	Erhöhe den erzeugte Last der Busse zwischen bus 654-622, 710-646 und 704, 628, 670, 689 um das 55-fache	X	

F18	Erhöhe den erzeugte Last der Busse zwischen bus 654-622 um das 10-fache	X	
F19	Ausfall Line 204 (NS-Ebene)		
F20	Ausfall Line 204	X	
F21	Ausfall Bus 671 (NS-Ebene)		
F22	Ausfall Bus 10 (MS-Ebene)		
F23	Ausfall Bus 10, Schaltung 243 an Bus 101 geschlossen		X
F24	Ausfall Bus 10, Schaltung 243 an Bus 101 geschlossen	X	X
F25	Ausfall Transformator 8		
F26	Ausfall Transformator 8	X	
F27	Ausfall Busse 642, 654, 710 und 693		
F28	Erhöhung der Kern-Verluste des Transformator 8 auf 5 kW		
F29	Veränderung der Stufenschaltung auf 5 des Transformators 8		
F30	Verringerung des Derating Faktors auf 0,35 des Transformators 8		
F31	Erhöhung des Offen-Schleife-Verlustes auf 50 % des Transformatoren 8		
F32	Veränderung der Spannung des externen Netzes auf 1,05 pu		

Tabelle 8.2: Modellierte und eingebettete Faults.

8.3 BEREITSTELLUNG DES DATENSATZES

Da das Netz für jeden Zeitschritt des festgelegt Zeitraumes simuliert werden muss, entstehen zu jedem Zeitschritt Ergebnisdaten des Netzes. Diese Daten wurden zu jedem Zeitschritt erfasst und in einem *pandas*-Dataframe gespeichert und um eine Spalte erweitert, um den entsprechenden Zeitschritt anzugeben in dem die Daten entstanden sind. Der Aufbau dieses Dataframes wird in [Abbildung A.11](#) exemplarisch dargestellt. Da die Ergebnisdaten in *pandapower* [12] in unterschiedlichen Dataframes komponentenweise zur Verfügung gestellt werden, ist jedes dieser Dataframes, welche veränderte Ergebnisdaten enthält, als *CSV*-Datei exportiert worden.

Die Ergebnisdaten (*res_load*, *res_bus*, *res_line*, *res_trafo*, *res_sgen*, *res_ext_net* und *res_storage*) wurden über den Zeitraum der Simulation zu jedem Zeitschritt gespeichert. Zu den genannten Ergebnisdaten ist das Netz, welches die Fault-Implementierung enthält, mit Hilfe des *simBench*-Paketes als *simBench*-Datensatz ebenfalls im *CSV*-Format exportiert und gespeichert worden.

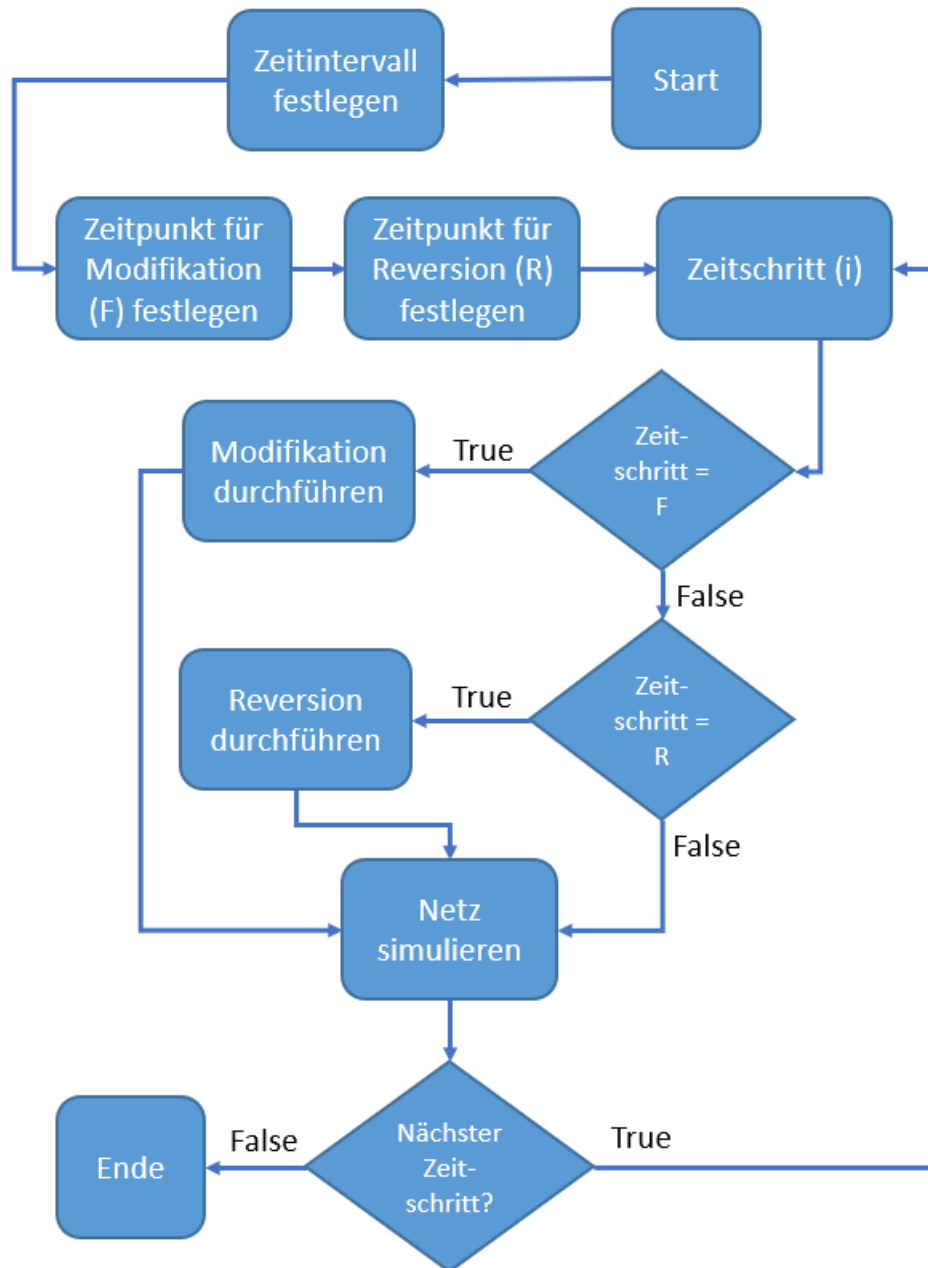


Abbildung 8.2: Programmablauf der Simulation mit Fault und Reversion (eigene Darstellung).

9

Evaluation

Für die Evaluation werden ähnliche Datensätze gesucht und verwendet, um sie mit den in dieser Arbeit entstandenen Datensätzen zu vergleichen. Dafür werden zunächst Eigenschaften von Datensätzen vorgestellt. Diese werden in [Abschnitt 9.1](#) als Grundlage genutzt, um Unterschiede gegenüber den Datensätzen aufzuzeigen.

9.1 VERGLEICH MIT ANDEREN BEKANNTEN DATENSÄTZEN

Für den Vergleich wurden zunächst Eigenschaften des modellierten Modells und der daraus entstandenen Datensätze aufgelistet. Die Auswahl der Eigenschaften wurde aufgrund der aus dem Konzept zugrunde liegenden Eigenschaften getroffen und um typische Eigenschaften von Datensätzen, wie die Anzahl der Datenpunkte, ergänzt. Die Eigenschaften sind der [Tabelle 9.1](#) zu entnehmen, die auch die entsprechenden Kennzahlen der Vergleichsdatensatz (VD) enthält.

Der erste zum Vergleich stehende Datensatz „Electrical Fault detection and classification“ [\[185\]](#) wurde von Prakash veröffentlicht und wird folgend als VD-1 bezeichnet. Dieser wurde in dem Paper von Jamil et al. [\[186\]](#) verwendet. Im Gegensatz zu den folgenden in der Evaluation betrachteten Datensätzen, ist dieser der einzige, der über kaggle [\[187\]](#) öffentlich zur Verfügung gestellt wird. Dadurch können mehr Informationen über diesen Datensatz zum Vergleich bereit gestellt werden. Daher wird dieser Datensatz anschließend besonders betrachtet. Dieser bildet in *MatLab* [\[109\]](#) ein kleines Energiesystem mit vier Generatoren, einer 3-Phasen Übertragungsleitung und Transformatoren ab und wird bei einer Frequenz von 50 Hz betrieben. Das Modell wurde für den Zweck entwickelt 3-Phasige Faults in Übertragungsleitungen einzubetten. Dafür wurde die Übertragungsleitung mit einer Länge von 300 km und einer Nennspannung von 505 Volt modelliert. Die Daten von 456 Simulationen des Faults an zufällig gewählten Punkten der Übertragungsleitungen wurden zu dem Datensatz zusammengeführt. Dieser bietet dadurch insgesamt 12000 Datenpunkte, welche die Spannung und die Stärke der Leitung beziehungsweise der einzelnen Phasen aufzeichnen. Zudem enthält der Datensatz ein Label das angibt, ob die Daten während eines Faults entstanden sind.

Werden die Eigenschaften von VD-1 mit denen in dieser Arbeit erstellten Datensätzen verglichen, fällt auf, dass dieser ein Netz in einem kleineren Maßstab abbildet, da wesentlich weniger Komponenten innerhalb der Simulation verwendet worden sind und die Anzahl der enthaltenen Datenpunkte um ein vielfaches kleiner ist. Auch die Diversität der eingebetteten Faults ist geringer, da sich bei VD-1 die eingebetteten Faults auf Faults der Übertragungsleitung begrenzen. Dem gegenüber werden in dem erstellten Datensatz Faults eingebettet, die auch andere Komponenten, wie Transformatoren und Lasterzeuger, beinhalten. Allerdings spiegeln das für den VD-1 modellierte Netz ein Höchstspannungsnetz wieder. VD-1 bildet zudem keinen Zeitraum ab, sondern nur die

Eigenschaft	Eigener Datensatz	VD-1	VD-2	VD-3
Anzahl Knoten	9104	2	12	n. a.
Anzahl Leitungen	8998	1	~34	n. a.
Anzahl aller Komponenten	47881	n. a.	n. a.	n. a.
Zeitraum	7 Tage	-	1 Sekunde	41 Tage
Zeitschritte	672	-	n. a.	n. a.
Spannungsebenen	MS, NS	HS	NS	HS, MS
Realistische Lastprofile	Ja	n. a.	n. a.	Ja
Realistische Erzeugungsprofile	Ja	n. a.	n. a.	Ja
Anzahl eingebetteter unterschiedlicher Faults	32	5	1	n. a.
Anzahl bereitgestellter Variablen	41	10	n. a.	12
Gespeicherte Datenpunkte pro Zeitschritt	~185000	n. a.	n. a.	n. a.
Gespeicherte Datenpunkte eines simulierten Zeitraumes	~125 Mio.	n. a.	n. a.	n. a.
Insgesamt bereitgestellte Datenpunkte	4 Mrd.	12000	n. a.	n. a.
Daten sind gelabelt	Nein	Ja	Ja	Ja

Tabelle 9.1: Vergleich der Eigenschaften der Datensätze.

Variablen zu einem Zeitpunkt mit oder ohne Fault.

Über die folgenden **VD** sind nur begrenzte Informationen verfügbar, da die Datensätze nicht direkt zur Verfügung stehen und lediglich in der Veröffentlichungen der Autoren beschrieben werden. Der Vergleich der beschriebenen **VD** wird daher in der [Tabelle 9.1](#) vorgenommen und folglich werden zunächst nur die Eigenschaften beschrieben.

Mohammadi et al. [188] haben in ihrer Arbeit, im Folgenden **VD-2** genannt, Datensätze auf Grundlage des „IEEE 13 Node Test Feeder“-Netzes [189] erstellt. Die **VD-2** enthalten Informationen über Faults, die den Stromfluss in unterschiedlichen Komponenten unterbrechen, wie in Umspannwerken, Lastzentren und Übertragungsleitungen. Das Netz wurde über den Zeitraum von einer Sekunde simuliert und ein Fault wurde zum Zeitpunkt 0,5 Sekunden, durch das Öffnen einer Schaltanlage, eingebettet. Der Fault wurde nach 0,05 Sekunden nach dem Auftreten wieder aufgehoben, indem die Schaltanlage wieder geschlossen wurde. Bei der Simulation der unterschiedlichen Faults wurden insgesamt 756 Trainingsdatensätze und 504 Testdatensätze erstellt.

Der **VD-3** „SVAN22LY1“ wird in der Arbeit von Eikeland et al. [190] verwendet. Hierbei handelt es sich im Gegensatz zu den vorherigen Datensätzen nicht um ein Modell, sondern stellt Daten aus einem realen Energiesystem in der Arktis dar. Dazu wurden die Daten des Netzes, wie Frequenz, Spannungsimbalance, aktiver und reaktiver Stromfluss sowie der minimale Stromfaktor, gespeichert. Diese wurden in Perioden während des Auftretens eines Faults und während des Betriebes ohne Fault aufgezeichnet und gelabelt. Der Datensatz deckt somit einen Zeitraum von ungefähr einein-

halb Monaten ab und enthält 90 Datensätze, welche nachgewiesen Faults enthalten, sowie 1647 Datensätze ohne Faults [191].

Abschließend kann im Hinblick auf die aufgestellten Forschungsfragen festgestellt werden, dass diese in diese Arbeit beantwortet werden konnten. Für die Bearbeitung der [Forschungsfrage 1](#) wurde eine Literaturanalyse vorgenommen sowie eine Taxonomie erstellt und es wurden Faults formuliert, die exemplarisch kategorisiert wurden.

Die Faults, welche durch die Literaturanalyse in [Kapitel 4](#) gefunden und aufgelistet wurden, decken viele Bereiche und Komponenten innerhalb eines CPES ab und geben einen Überblick über die möglichen Faults. Besonders häufig auftretende Faults oder Faults, welche durch ihre starken Auswirkungen auf ein Energiesystem eine besonders große Bedeutung haben, wurden gefunden und sind in der Auflistung enthalten. Jedoch sind, durch die Ausklammerung von bestimmten Faults, auch Lücken bei der Analyse entstanden. Auch die untersuchte Anzahl an Quellen in Relation zu allen Quellen, die Faults in CPES enthalten, und die Änderung der Vorgehensweise der Analyse, lassen den Schluss zu, dass nicht alle Faults gefunden werden konnten. Allerdings ist die Auflistung aller möglichen Faults innerhalb eines CPES auch nicht abschließend möglich, da sich neben der Anzahl der Komponenten auch die Art der Komponenten stetig verändert, sodass immer neue Faults hinzukommen können.

Die in der Taxonomie formulierten Kategorien, ermöglichen es die verschiedenen Faults, welche in der Literaturanalyse gefunden worden sind, zu kategorisieren. Auch die Möglichkeit Faults aus den unterschiedlichen Disziplinen, der IKT und der Energietechnik aus denen ein CPES besteht, einordnen zu können, wird durch die erstellte Taxonomie gegeben. Allerdings findet die Kategorisierung aus diesem Grund auch auf einer oberflächlichen Ebene statt. Dies führt dazu, dass die Eigenschaften der Faults lediglich grob umrissen werden.

Um die [Forschungsfrage 2](#) beantworten zu können, wurden zunächst Anforderungen an das zu modellierende System gestellt und ein Konzept erarbeitet. Die durch die Simulation des Modells entstandenen Datensätze sind mit anderen Datensätzen zum Vergleich herangezogen worden. Bei der Evaluation der Datensätze fällt zunächst auf, dass nur wenige vergleichbare Datensätze gefunden wurden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass viele Datensätze, welche in wissenschaftlichen Arbeiten genannt werden, nicht öffentlich zur Verfügung stehen und oftmals nur eine Insellösung für die untersuchte Problematik und den Anwendungsfall darstellen. Es konnte kein Datensatz gefunden werden, welcher, wie der Datensatz, der in dieser Arbeit erstellt worden ist, Daten über unterschiedliche Faults bereitstellt. Ebenso sind die vergleichbaren Datensätze von kleinerem Umfang. Nicht nur die Anzahl der darin enthaltenen Komponenten ist wesentlich kleiner sondern auch die Variablenanzahl, welche aufgezeichnet worden sind. Allerdings bieten die Datensätze auch gelabelte Daten und zum Teil auch die zufallsbasierte Auswahl der aufgezeichneten Faults, worin sie sich von dem erzeugten Datensatz unterscheiden.

Außerdem konnten Faults nicht implementiert werden, welche zwar durch die Literaturanalyse gefunden wurden, aber sich durch die gegebenen Rahmenbedingungen der verwendeten Technologien, nicht einbetten ließen. Daher konnten Faults auf der Cyber-Ebene nur indirekt implementiert werden. Dafür wurden die Auswirkungen betrachtet, die bei solch einem Fault entstehen können. Diese Auswirkungen konnten wiederum als Fault eingebettet werden. Teilweise war es auch nicht möglich Faults zu integrieren, wie bei Faults, welche in 3-Phasen Komponenten vorkommen, da diese Komponenten nicht in dem erzeugten Modell enthalten sind. Die Auswahl der Faults wurde generell durch diese Problematik beeinflusst, sodass die meisten eingebetteten Faults Eigenschaften der im Netz modellierten Komponenten verändern, um Faults abzubilden. Ebenso konnte das Netz nicht bis zum Erliegen beeinträchtigt werden, um einen Blackout oder kaskadierende Faults zu simulieren, da das Netz ansonsten in *pandapower* [82] nicht mehr simuliert werden würde. Auch die Simulation von Null-Impedanz-Faults ist in *pandapower* nur bedingt umzusetzen, da die Simulation nicht fortgeführt wird sobald im Netz eine Impedanz von Null auftritt. Allerdings wurde zur Abbildung solcher Faults ein Wert nahe Null verwendet, um eine Einbettung zu ermöglichen.

Mit Hilfe der Konzeptionierung und Implementierung der Muss-Anforderungen sowie der Evaluation kann die [Forschungsfrage 2](#) als beantwortet betrachtet werden.

11

Ausblick

Das folgende Kapitel soll einen Ausblick über Verbesserungen und Vorschläge bieten, welche weiterführend untersucht werden können. Diese werden in die Schwerpunkte Literaturanalyse und Taxonomie, in [Abschnitt 11.1](#) sowie Modellierung und Bereitstellung der Faults in [Abschnitt 11.2](#), gegliedert.

11.1 LITERATURANALYSE UND TAXONOMIE

Die vorgenommene Literaturanalyse weist einige Verbesserungsmöglichkeiten auf. Die Anzahl der Iterationschritte und auch die Anzahl der betrachteten Quellen pro Schlagwort kann weiter erhöht werden. Dadurch wäre eine bessere Abdeckung der Literatur, welche das Schlagwort enthält, möglich. Zudem steigt durch die Anzahl der untersuchten Quellen der Detailgrad mit der die Faults beschrieben werden, wodurch wiederum Faults gefunden werden können, welche nicht nur oberflächlich Komponenten beeinflussen. Zudem können die in den Rahmenbedingungen für die Literaturanalyse ausgeklammerten Faults näher untersucht werden. Die hier erstellte erste Basisliste wurde auf Grundlage einer Arbeit, welche die Resilienz eines Energiesystem fokussiert, vorgenommen. Es könnten auch mehrere Arbeiten betrachtet werden und die Schnittmenge der genannten Faults als erste Basisliste verwendet werden oder es könnten Experteninterviews als Grundlage verwendet werden. Somit wäre die erste Basisliste unbeeinflusst von der Thematik einer bestimmten Arbeit.

Durch das Hinzufügen weiterer Kategorien nach der ersten Kategorisierung von Faults könnten diese genauer zugeordnet werden. So könnten Faults, dessen Persistenz als transient eingeordnet wurden, folglich noch darin unterteilt werden, wann sich der Zustand wieder normalisiert oder ob der Zeitpunkt unabsehbar in der Zukunft liegt. So könnten weitere Ebenen der Taxonomie hinzugefügt werden, um Faults besser zu kategorisieren.

11.2 MODELLIERUNG UND BEREITSTELLUNG DER FAULTS

Die Modellierung des Netzes kann durch das Hinzufügen weiterer Komponenten, welche nicht in dem für die Erstellung des Netzes verwendetem *simBench* [13] enthalten waren, erweitert werden. Beispielsweise könnte auch ein Netz angebunden werden, welches 3-Phasen unterstützt oder welches mehrere Umspannwerke besitzt. Dadurch wäre es möglich Faults einzubetten, welche nur in solchen Komponenten auftreten können. Ebenso wäre es denkbar Module für *pandapower* zu entwickeln, welche die Einbindung von IKT-Technologien ermöglichen, um Faults auf Ebene dieser zu modellieren. Auch die Umsetzung der Soll-Anforderungen S-13 und S-14, welche eine randomisierte Auswahl der vorkommenden Faults und des simulierten Zeitpunktes beschreiben. Mit der

Umsetzung könnten die Daten von Simulation zu Simulation unterschiedliche Datensätze ergeben und verschiedene Faults einbetten. Durch stochastische Verteilungsmethoden, wie in der Arbeit von Mohammadi et al. [188], könnte der Zeitpunkt und Ort für die Einbettung verändert werden, um durch mehrmaliges simulieren, realitätsnahe Verteilungen zu erhalten. Der hier bereitgestellte Datensatz enthält keine Label, ob zu dem Zeitpunkt an dem der Datenpunkt gespeichert wurde, ein Fault das Netz beeinflusste. Allerdings kann dadurch, dass der Zeitpunkt für die Induzierung eines Faults vor der Simulation festgelegt wurde und bei allen Datensätzen bei Zeitschritt 150 geschieht, genau gesagt werden, welche Datenpunkte beeinflusst wurden. Um das Training von [ML-Methoden](#) zu ermöglichen, die das Prinzip des überwachten Lernens verwenden, könnten die Zeitschritte zusätzlich direkt im Datensatz mit einem Label versehen werden.

A.1 VERÄNDERUNGEN DES NETZES

Folgende Abbildungen beschreiben exemplarisch die Veränderung bestimmter Kennzahlen des Netzes, wenn ein Fault eingebettet worden ist, im Vergleich zu den Kennzahlen des unbeeinflussten Netzes.

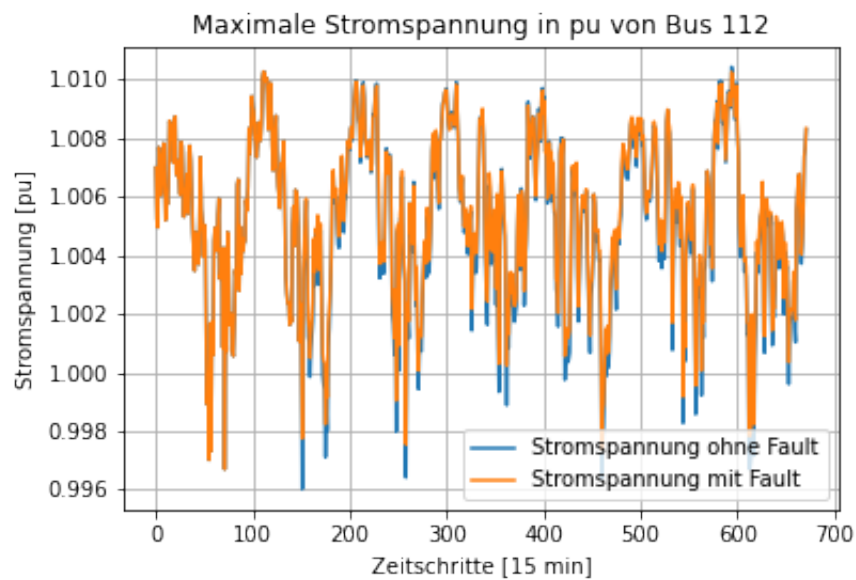


Abbildung A.1: Fault 1: Maximale Spannung von Bus 112 (eigenen Darstellung).

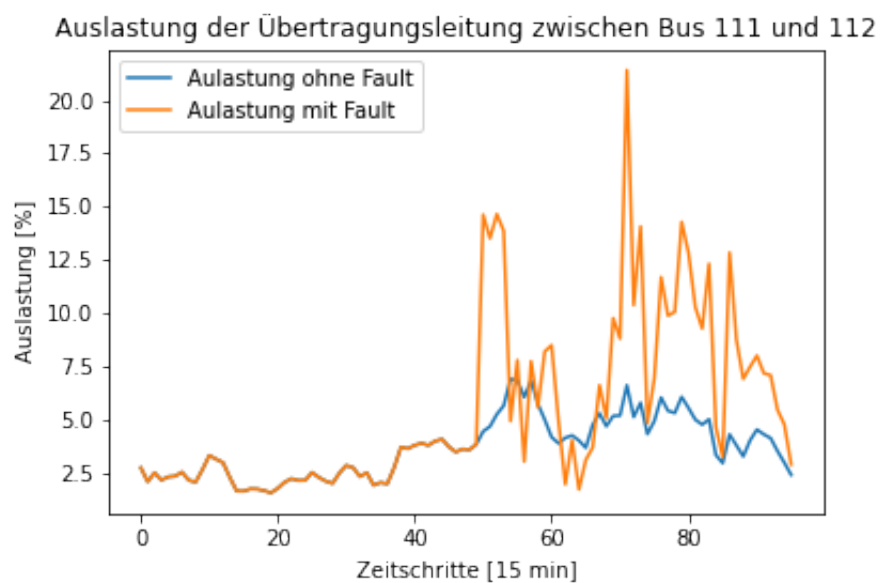


Abbildung A.2: Fault 2: Auslastung der Leitung zwischen Bus 111 und 112 (eigenen Darstellung).

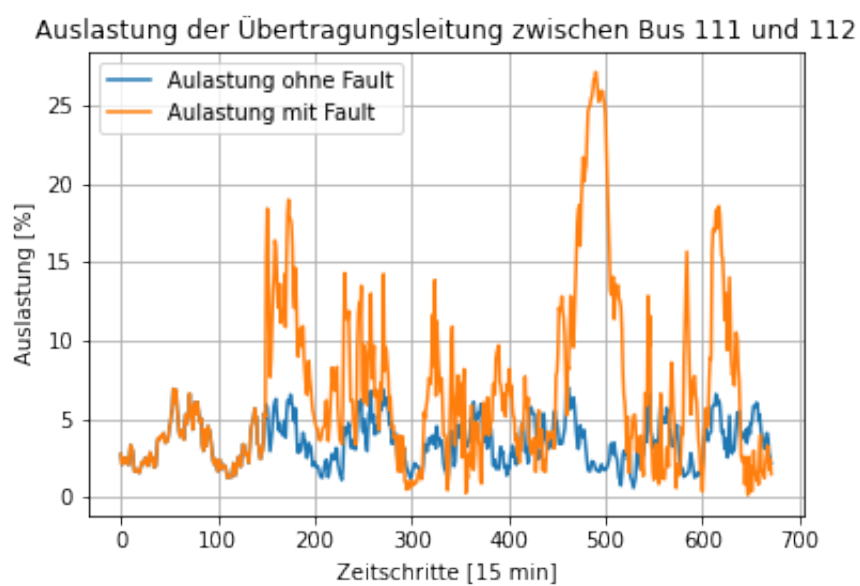


Abbildung A.3: Fault 3: Auslastung der Leitung zwischen Bus 111 und 112 (eigenen Darstellung).

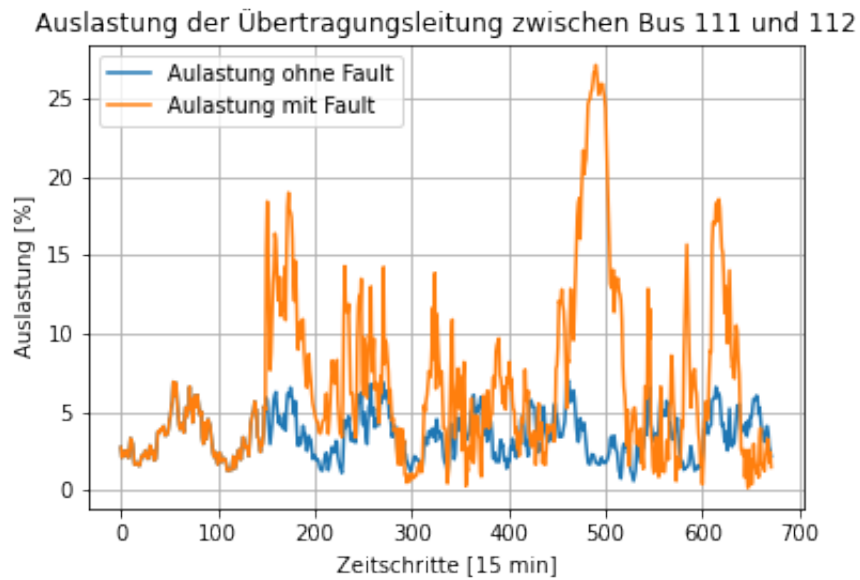


Abbildung A.4: Fault 4: Auslastung der Leitung zwischen Bus 111 und 112 (eigene Darstellung).

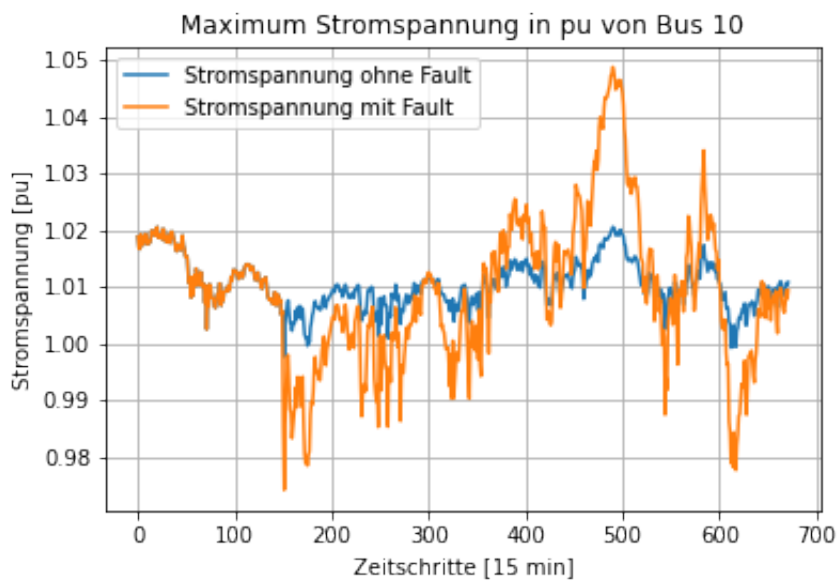


Abbildung A.5: Fault 6: Maximale Stromspannung von Bus 10 (eigene Darstellung).

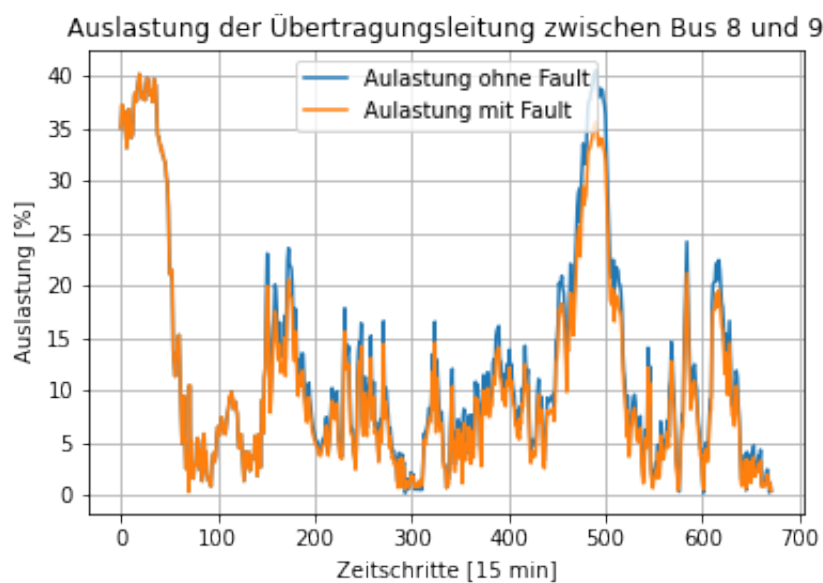


Abbildung A.6: Fault 12: Auslastung der Leitung zwischen Bus 8 und 9 (eigene Darstellung).

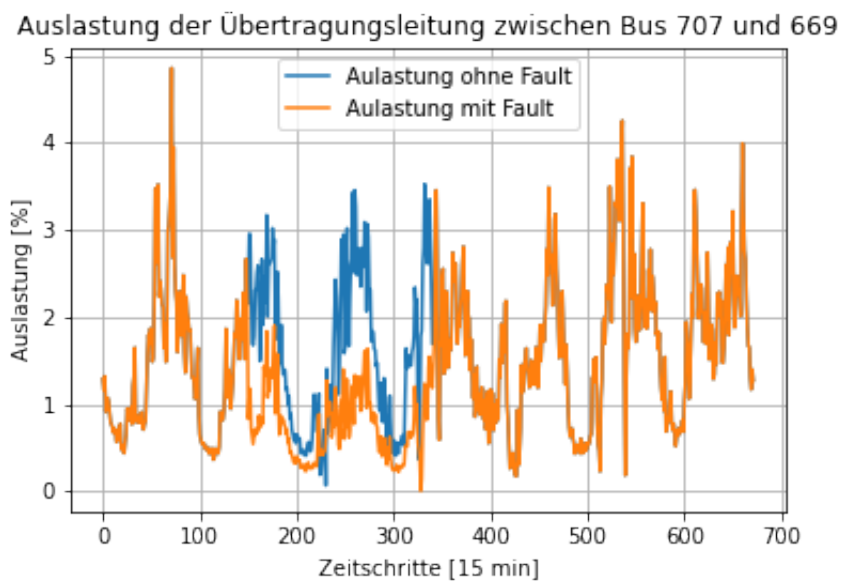


Abbildung A.7: Fault 20: Auslastung der Leitung zwischen Bus 707 und 669 (eigene Darstellung).

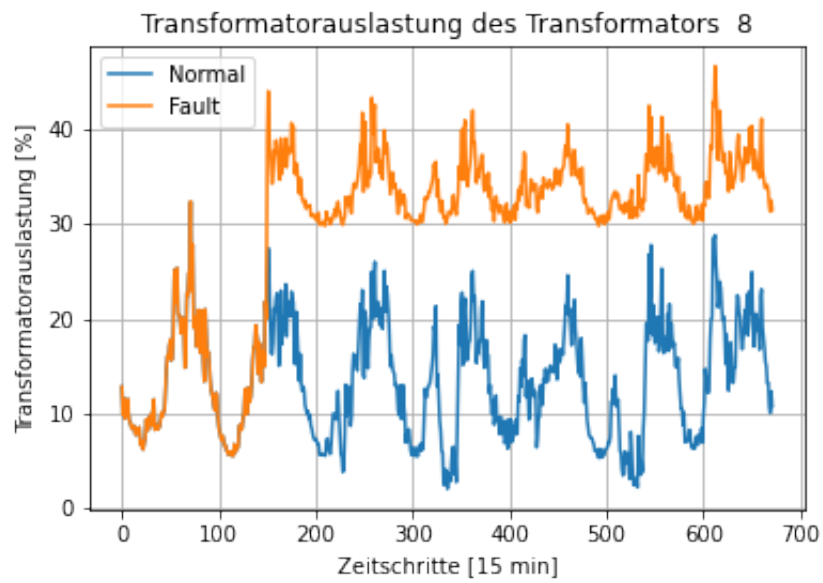


Abbildung A.8: Fault 31: Auslastung des Transformator 8 (eigene Darstellung).

A.2 IMPLEMENTIERUNG DER METHODE ZUR ZEITREIHENSIMULATION

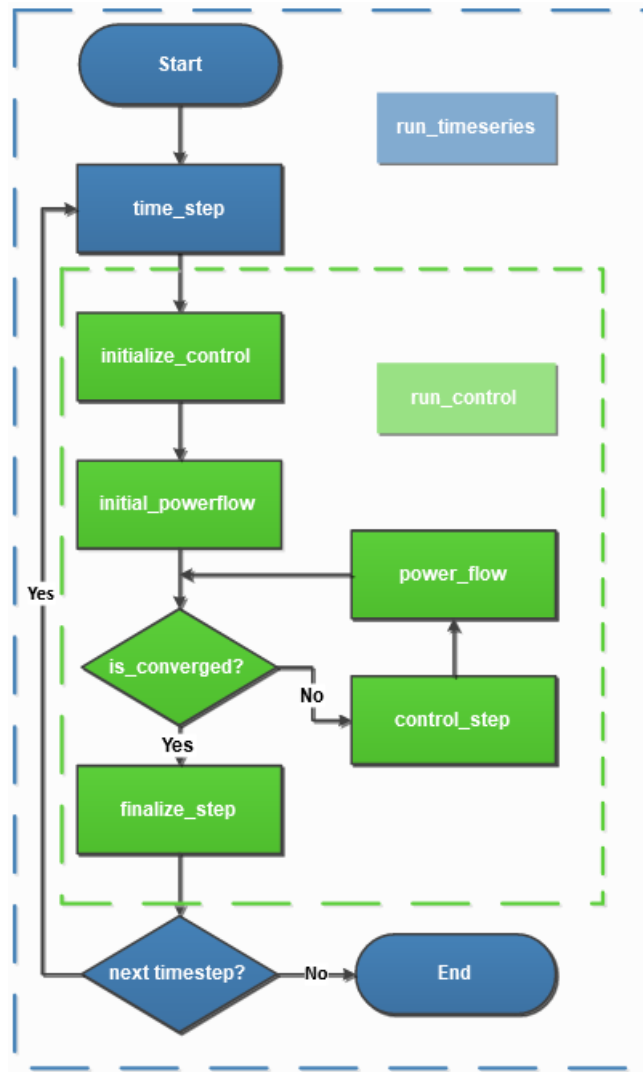


Abbildung A.9: Schleife des Zeitreihen-Moduls [192]

A.3 KATEGORISIERUNGSBAUM FÜR SMART GRID GEFAHREN

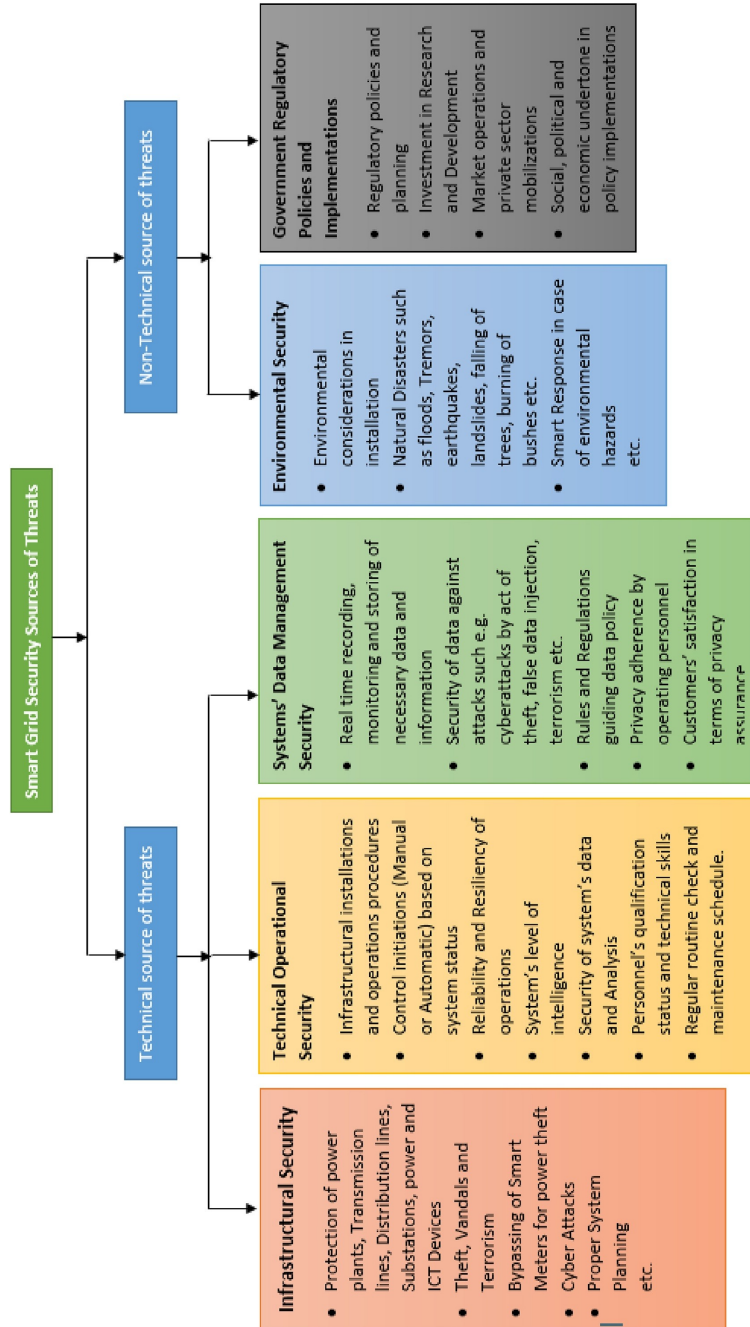


Abbildung A.10: Kategorisierungsbaum für Smart Grid Gefahren ([102]).

A.4 EXEMPLARISCHER AUFBAU EINES DATAFRAMES

Index der Komponente

↓

	1	2	3	4	5	time_step
p_mw	0.56	0.62	0.67	0.64	0.70	1
q_mvar	0.01	0.02	0.12	0.06	0.08	1
p_mw	0.56	0.73	0.89	0.69	0.78	2
q_mvar	0.02	0.04	0.14	0.10	0.09	2

↑

Variablenwert

Variablen-
name →

← Zeitschritt

Abbildung A.11: Beispielhafter Aufbau eines Dataframes (eigene Darstellung).

A.5 VOLLSTÄNDIGE BASISLISTE NACH DER 2. ITERATION

Name	Quelle	Name	Quelle
AC Fault	[193, 194]	Conductor Fault	[195, 196, 197, 198] [199]
Actuator Failure (Stuck in one State)	[200]	Conductor Galloping	[201, 202, 203, 123]
Advanced Metering Infrastructure Failure	[204]	Connection Failures	[205, 204, 206]
Algorithmic Failure	[207]	Consecutive Commutation Failure	[194]
Arcing (Line)	[208, 195, 209, 210] [123]	Constant Impedance Fault	[197]
Arcing (Substation)	[211, 212, 213, 214]	Control Cubicle Fault	[215, 134]
Arcing (Transformer)	[216, 217]	Control Panel Failure	[218]
Arrester Error	[219]	Control System Error	[220]
Asymmetric Fault	[221, 222, 223]	Converter Fault	[224, 225]
Asymmetrical Voltage Sag	[226]	Cooling Defect (Transformer)	[219, 227]
Auxiliary Facility Failure (Overhead Line)	[228]	Core Failure (Transformer)	[227]
Backfeed Fault	[198]	Corona (Transformer)	[216]
Bad Model For SCADA	[125]	Crossover Fault	[229]
Bad Software Recommendation	[230]	Current Overload	[231, 232, 143, 173]
Balanced Fault	[233, 234, 235, 136] [137]	Data Congestion	[205]
Balanced Voltage Sag	[233] [139, 140, 141, 142] [143, 144, 145, 125] [146, 147, 148, 149] [150, 151, 152, 138] [153, 128, 154, 130] [129, 155, 156, 126]	Data Transfer Delay	[236, 237, 238, 125]
Blackout	[157, 135, 158, 159] [124, 127, 132, 160] [193, 239, 240, 204] [241, 242, 243, 244] [245, 246, 247, 248] [249, 194, 250, 251] [252, 253] [128, 161, 254, 255] [256, 198]	Data Transfer Interrupted	[125, 130, 214]
Blown Fuse	[195, 196, 197, 198]	DC Blocking Fault	[257]
Broken Conductor	[245]	DC Fault	[193, 194]
Bunch Drop (Insulator)	[258]	Discharge (Transformer)	[217]
Burn Out (Insulator)	[259, 260, 261]	Dielectric Fault (Transformer)	[227]
Bus Bar Fault	[227]	Disconnected Switches	[165, 262, 263, 249] [129, 132, 169, 146] [264, 265, 266, 255]
Bushing Failure (Transformer)	[219]	Distribution Line Fault	[229]
Capacitor Error	[140, 162, 142, 129] [126, 153, 127, 163] [164, 152, 165, 138] [159, 128, 143, 145] [130, 132, 160, 149] [147, 148, 166, 167] [168, 150, 267, 252] [244, 239, 242, 268] [246, 247, 207, 249] [194, 269, 193, 270] [165, 218, 261, 260] [256, 270]	Double Circuit Fault	[141, 143, 176, 254] [222, 271, 272, 273] [195, 265, 266, 274] [275, 276, 277, 278] [279]
Cascading Fault	[130, 132, 160, 149] [147, 148, 166, 167] [168, 150, 267, 252] [244, 239, 242, 268] [246, 247, 207, 249] [194, 269, 193, 270]	Double Phase-To-Ground Fault	[141, 143, 176, 254] [222, 271, 272, 273] [195, 265, 266, 274] [275, 276, 277, 278] [279]
Circuit Breaker Fault	[165, 218, 261, 260] [256, 270]	Downed Wires	[129, 209, 280, 198]
Common Cause Fault	[130, 218, 269]	Eddy Current Loss	[219]
Commutation Failure	[193, 257, 194]	False Load Forecast	[125, 281, 268]
Compatibility Problem	[125, 282, 236, 248]	False Sensor Data	[125, 283, 284, 285, 133]
Computing Node Failure	[200]	Feeder Fault	[261]

Tabelle A.1: Basisliste nach der zweiten Iteration. (1/3)

Name	Quelle	Name	Quelle
Feeder Trip	[286]	Interturn Fault (Transmission Line)	[287, 288]
Fittings Failure (Overhead Line)	[228]	Inverter Fault	[194, 161]
Flashover (Insulator)	[253]	Inverter Overhead	[194]
	[201, 253, 202, 289]		
Flashover (Line)	[196, 258, 290, 129]	Inverter Tripping	[291]
	[134, 123]		
Forward Fault	[292]	Line Fault	[250, 210, 293, 294] [218, 260, 126, 128] [127, 129, 130]
Foundation Failure (Overhead Line)	[228]	Line Sagging	[134, 135] [201, 234, 286, 240]
Frequency Deviation	[90, 138, 222, 295] [296, 297]	Line Trip	[239, 243, 258, 278] [252, 244, 298, 299] [300]
Generator Fault	[124]		
Generator Malfunction	[157, 158, 159]		
Generator Tripping	[143, 142, 126, 301] [302, 243, 303]	Lost Synchronism	[221, 143]
GIS Partial Discharge (Switchgear)	[304]	Low Current Arcing Fault	[197]
Ground Device Failure (Overhead Line)	[305, 267]	Low Current Fault	[209]
Ground Fault	[161, 173, 266, 306] [292, 307, 308, 309] [310, 215, 311]	Low Impedance Fault	[198, 312]
Hardware Fault	[313, 207, 314, 269]	Low Impedance Ground Fault	[193]
Hidden Fault	[194, 255, 152]	Missing Sensor Data	[200, 315]
Hidden Failure (Protection Devices)	[139, 129, 243, 241]	Multiphasor Generator Failure	[157, 158, 159, 124]
High Current	[210, 316] [134, 317, 195, 280]	n-2 Fault	[218]
High Impedance	[210, 293, 294, 209] [197, 198, 255, 212]	Network Error	[239, 285]
High Impedance Arcing	[209]	Node Failure	[205]
High Resistance Fault	[309, 274]	Offline Generator Energizing	[301]
Highly Resistive Fault	[318]	Open Conductor	[317, 307] [152, 319, 320, 321] [240, 322, 323]
I/O Device Unresponsive	[200]	Over Excitation	[261, 324, 152] [123, 140, 228, 234] [325, 289]
Identifying Link Failure	[237]	Overcurrent (Substation)	[134, 169, 147, 132] [129, 305, 267]
Incorrect Software Logic	[138]	Overhead Line Failure	[256]
Inductive Fault	[326]	Overhead Tower Malfunction	[253]
Insulation Fault (Transmission Line)	[287]	Overheating (Circuit breaker)	[199, 256]
Insulator Fault	[134, 287, 228] [149, 278, 307, 229] [327]	Overheating (Insulator)	[199, 256]
Inter Circuit Fault	[149, 278, 307, 229] [327]	Overheating (Substation)	[216, 217, 219]
Interdependent Failures	[124, 239]	Overheating (Transformer)	[216, 217, 219]
Interturn Fault (Transformer)	[287]	Overloaded Stator Wires (Generator)	[240] [129, 328, 329, 252] [194, 276, 246, 330] [300, 206, 290]
		Overload (Line)	

Tabelle A.2: Basisliste nach der zweiten Iteration. (2/3)

Name	Quelle	Name	Quelle
Overload (Substation)	[331]	Tank Failure (Transformer)	[227]
Overvoltage	[331, 257, 332, 138]	Tap Changer Failure (Transformer)	[227]
Overvoltage (Substation)	[224, 215]	Terrestrial Link Failure	[205]
Permissive Overreach	[234]	Thermal Overload	[328, 333, 330, 290]
Transfer Trip	[137, 136]	Three Phase Bolted Fault	[300, 129, 138]
Phase Unbalance	[334, 234, 258, 274]		[311]
	[287, 335, 257, 336]		[338, 276, 265, 278]
	[261, 255, 292, 210]		[193, 292, 339, 301]
Phase-To-Phase Fault	[136, 141, 170, 172]	Three Phase Fault	[257, 234, 336, 318, 311]
	[173, 265, 278, 266]		[161, 137, 170, 143]
	[337, 276, 279, 326]		[222, 265, 340, 244]
	[277, 272, 275]		[266, 292, 276, 279]
Physical Attack On Smart Meter	[125]	Three Phase-To-Ground Fault	[272, 175, 145]
			[172]
			[157, 174, 165, 178]
Power Grid Fault	[129]	Transformer Fault	[?, 129, 179, 128, 336]
			[216, 219, 255]
Power Interruption (Voltage < 10% of Normal)	[248]	Transformer Wings Malfunction	[134, 287, 288, 227]
Power Plant Shutdown	[146, 174, 157]	Transient High Frequency (Generator)	[194]
			[339, 273, 278, 246]
Protection Failure (Transformer)	[227]	Transmission Line Fault	[207, 341, 134, 169]
			[151, 135, 139, 165]
Protection Relay Fails	[194]	Trigger Pulse Fault	[239, 159, 129]
Protection Relay Trip	[241, 324, 243]	Unbalanced Fault	[257]
Resistive and Inductive Fault	[326]	Under Excitation	[222, 291, 335, 235]
Resistive Fault	[326]	Underfrequency	[233, 271, 137, 136]
Reverse Direction Fault	[292]	Underground Cable Fault	[319, 320, 240, 152]
	[142, 137, 170, 173]		[143, 155, 138]
	[176, 129, 200, 309]		[342, 317, 343, 129]
Short Circuit Fault	[253, 276, 279, 326]	Underload	[344]
	[272, 341, 275, 222]		
	[233, 286, 224, 213]		
	[225, 220, 311, 142]		
Shunt	[273, 317, 334, 277]	Unstable Power Angle (Generator)	[194]
Simultaneous Commutation Failure	[194]	Unsynchronized Data In Scada System	[345, 346, 347, 125]
Simultaneous Ground Fault	[292]	Upstream Network Fault	[348, 306, 271, 180]
	[149, 141, 234, 298]		
	[292, 210, 310, 222]		
	[254, 193, 194, 271]		
	[273, 265, 340, 278]		
Single Phase-To-Ground Fault	[338, 251, 266, 195]	Utility Pole Malfunction	[178, 349, 350, 351]
	[292, 243, 276, 312]		
	[259, 308, 309, 334]		
	[327, 277, 272, 274]		
	[264, 287, 336]		
Software Fault	[200, 313, 246, 207]	Voltage Instability	[129, 329]
	[126, 159]		
	[352, 219, 260, 146]		
Substation Fault	[174, 158, 178, 159]	Voltage Sag	[137, 125, 222, 353]
	[128]		[234, 223, 226]
Overcurrent (Substation)	[261, 324]	Voltage Swell	[222, 223]
Switch Gear Fault	[134, 354]	Wrong State Estimation of Grid	[283, 133]
Symmetric Fault	[208, 309, 222, 221]		
	[223]		

Tabelle A.3: Basisliste nach der zweiten Iteration. (3/3)

Abbildungsverzeichnis

2.1	Abbildung der Netzebenen mit Erzeugern und Verbrauchern [14].	8
2.2	Abbildung der Regelleistung [15].	9
2.3	Beziehung der physischen Komponenten und der IKT in einem CPES (nach [27, 28]).	11
2.4	Eigenschaften einer Simulation (nach [34]).	12
2.5	Vorgehensweise einer systematischen Literaturrecherche (nach [87]).	20
3.1	Teilbaum des Kategorisierungsbaums (nach [95]).	28
3.2	Vereinfachte Darstellung des Kategorisierungsbaums für Smart Grid Gefahren (nach [102], Original Abbildung A.10).	30
4.1	Anzahl der Quellen der sieben häufigst genannten Faults nach der ersten Iteration (eigene Darstellung).	37
4.2	Verteilung der Faults nach der ersten Iteration nach Ebene und Bezug (eigene Darstellung).	40
4.3	Anzahl der Quellen nach Veröffentlichungsjahr (eigene Darstellung).	41
4.4	Verteilung der Faults nach der zweiten Iteration nach Ebene und Bezug (eigene Darstellung).	42
7.1	Komponenten der Konzeption (eigene Darstellung).	53
7.2	Beispielhafte schematische Darstellung eines MS-Netzes (eigene Darstellung). . . .	56
7.3	Ablauf der Simulation eines Zeitintervalls und der Einbettung eines Faults (eigene Darstellung).	57
7.4	Visualisierung des zeitlichen Ablaufs einer Simulation mit der Einbettung eines Faults (eigene Darstellung).	57
7.5	Visualisierung des zeitlichen Ablaufs einer Simulation mit der Einbettung eines Faults und dessen Reversion (eigene Darstellung).	58
8.1	Mittelspannungsebene des verwendeten Modellnetzes (eigene Darstellung).	60
8.2	Programmablauf der Simulation mit Fault und Reversion (eigene Darstellung). . .	64
A.1	Fault 1: Maximale Spannung von Bus 112 (eigene Darstellung).	73
A.2	Fault 2: Auslastung der Leitung zwischen Bus 111 und 112 (eigene Darstellung). . .	74
A.3	Fault 3: Auslastung der Leitung zwischen Bus 111 und 112 (eigene Darstellung). . .	74
A.4	Fault 4: Auslastung der Leitung zwischen Bus 111 und 112 (eigene Darstellung). . .	75
A.5	Fault 6: Maximale Stromspannung von Bus 10 (eigene Darstellung).	75
A.6	Fault 12: Auslastung der Leitung zwischen Bus 8 und 9 (eigene Darstellung). . . .	76

A.7	Fault 20: Auslastung der Leitung zwischen Bus 707 und 669 (eigene Darstellung). . .	76
A.8	Fault 31: Auslastung des Transformatoren 8 (eigene Darstellung).	77
A.9	Schleife des Zeitreihen-Moduls [192]	78
A.10	Kategorisierungsbaum für Smart Grid Gefahren ([102]).	79
A.11	Beispielhafter Aufbau eines Dataframes (eigene Darstellung).	80

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich verschiedener Eigenschaften von Simulationsanwendungen (nach [82]). . .	19
3.1	Auflistung von Faults (nach [88]).	24
3.2	Auflistung von Faults (nach [89]).	25
3.3	Auflistung von Faults (nach [90]).	26
3.4	Elementare Faults (nach [94]).	27
4.1	Basisliste nach der ersten Iteration.	39
5.1	Einordnung von Faults anhand der vorgestellten Taxonomie.	47
6.1	Funktionale Muss-Anforderungen.	49
6.2	Funktionale Soll-Anforderungen.	51
7.1	Netzeigenschaften des konzeptionellen Netzmodells.	55
8.1	Anzahl der Netzkomponenten und anderen Daten.	61
8.2	Modellierte und eingebettete Faults.	63
9.1	Vergleich der Eigenschaften der Datensätze.	66
A.1	Basisliste nach der zweiten Iteration. (1/3)	81
A.2	Basisliste nach der zweiten Iteration. (2/3)	82
A.3	Basisliste nach der zweiten Iteration. (3/3)	83

Literaturverzeichnis

- [1] Wilke, S.: Kraftwerke: konventionelle und erneuerbare Energieträger. Umweltbundesamt (2013). <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/kraftwerke-konventionelle-erneuerbare#wirkungsgrad-fossiler-kraftwerke> Accessed 2021-10-12
- [2] Dietrich, D., Kupzog, F., Haase, J.: Cyber physical systems beschreiben neue energiever-sorgungssysteme. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik **129**(4), 251–257 (2012). doi:10.1007/s00502-012-0009-0
- [3] Flaute, M., Großmann, A., Lutz, C., Nieters, A.: Macroeconomic effects of prosumer households in germany. International Journal of Energy Economics and Policy **7**, 146–155 (2017)
- [4] Mayer, C., Dänekas, C.: Smart grids – die bedeutung der informatik für die zukünftige energiever-sorgung. Informatik-Spektrum **36**(1), 78–89 (2012). doi:10.1007/s00287-012-0636-1
- [5] Neugebauer, R.: Digitalisierung Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft. Springer (2018). <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-55890-4>
- [6] Yu, X., Xue, Y.: Smart grids: A cyber-physical systems perspective. Proceedings of the IEEE **104**(5), 1058–1070 (2016). doi:10.1109/jproc.2015.2503119
- [7] BMWi: Was ist eigentlich "Demand Side Management"? <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2017/01/Meldung/direkt-erklaert.html>
- [8] Bendel, P.D.O.: Definition: Cyber-physische Systeme. Springer. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/cyber-physische-systeme-54077> Accessed 2021-10-11
- [9] Kritische Infrastru. https://www.kritis.bund.de/SubSites/Kritis/DE/Einfuehrung/Sektoren/Energie/Energie_node.html Accessed 2021-09-12
- [10] Azad, S., Sabrina, F., Wasimi, S.: Transformation of smart grid using machine learning. 2019 29th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC) (2019). doi:10.1109/aupec48547.2019.211809
- [11] Cintuglu, M.H., Mohammed, O.A., Akkaya, K., Uluagac, A.S.: A survey on smart grid cyber-physical system testbeds. IEEE Communications Surveys & Tutorials **19**(1), 446–464 (2017). doi:10.1109/comst.2016.2627399
- [12] pandapower. <http://www.pandapower.org/> Accessed 2021-10-14

- [13] SimBench (2020). <https://simbench.de/de/> Accessed 2021-09-12
- [14] Stromnetz | Energiepfad Grabs. <https://www.energiepfad.ch/wiki/stromnetz-transformator/> Accessed 2021-10-13
- [15] Regelleistung: Upside Group. <https://upsidegrp.com/de/regelleistung> Accessed 2021-09-14
- [16] Regelenergie: Die Energie für Netzstabilität. <https://www.eon.de/de/gk/energiewissen/regelenergie.html> Accessed 2021-09-14
- [17] Heuck, K., Dettmann, K.-D., Schulz, D.: Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung Elektrischer Energie für Studium und Praxis, 8., überarb. und aktualisierte auflage edn. Vieweg + Teubner, Wiesbaden (2010)
- [18] Stromnetz Transport | EnBW. <https://www.enbw.com/energie-entdecken/verteilung-und-transport/stromnetz/> Accessed 2021-10-13
- [19] Paschotta, D.R.: Hochspannung. <https://www.energie-lexikon.info/hochspannung.html> Accessed 2021-10-13
- [20] Paschotta, D.R.: Rundsteuertechnik. <https://www.energie-lexikon.info/rundsteuertechnik.html> Accessed 2021-10-12
- [21] Schwab, A.J.: Elektroenergiesysteme. Springer, (2009)
- [22] Kaluvala, N.S., Forman, A.: Smart grid. International Journal of E-Politics **4**(2), 39–47 (2013). doi:10.4018/jep.2013040103
- [23] BdeW: Smart Grids / Smart Meter. <https://www.bdeW.de/energie/smart-grids-smart-meter/> Accessed 2021-10-22
- [24] Aichele, C.: Smart Market: vom Smart Grid zum intelligenten Energiemarkt. Springer (2014)
- [25] Hassan, R., Radman, G.: Survey on smart grid. Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon) (2010). doi:10.1109/secon.2010.5453886
- [26] Nidhi, N., Prasad, D., Nath, V.: Different aspects of smart grid: An overview. Nanoelectronics, Circuits and Communication Systems Lecture Notes in Electrical Engineering, 451–456 (2018). doi:10.1007/978-981-13-0776-8_41
- [27] Strasser, T.I., Andrén, F.P.: Engineering and validating cyber-physical energy systems: Needs, status quo, and research trends. Lecture Notes in Computer Science Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, 13–26 (2019). doi:10.1007/978-3-030-27878-6_2
- [28] Inderwildi, O., Zhang, C., Wang, X., Kraft, M.: The impact of intelligent cyber-physical systems on the decarbonization of energy. Energy Environmental Science **13**(3), 744–771 (2020). doi:10.1039/c9ee01919g
- [29] Macana, C.A., Quijano, N., Mojica-Nava, E.: A survey on cyber physical energy systems and their applications on smart grids. 2011 Ieee Pes Conference On Innovative Smart Grid Technologies Latin America (Isgt La) (2011). doi:10.1109/isgt-la.2011.6083194

- [30] Rasmussen, T.B., Yang, G., Nielsen, A.H., Dong, Z.: A review of cyber-physical energy system security assessment. 2017 IEEE Manchester PowerTech (2017). doi:[10.1109/ptc.2017.7980942](https://doi.org/10.1109/ptc.2017.7980942)
- [31] Dumitrache, I., Constantin, N., Stoica, O.: Some challenges for the cyber – physical energy system. IFAC Proceedings Volumes **46**(6), 1–6 (2013). doi:[10.3182/20130522-3-ro-4035.00045](https://doi.org/10.3182/20130522-3-ro-4035.00045)
- [32] Wang, F., Lei, Z., Yin, X., Li, Z., Cao, Z., Wang, Y.: Information security in the smart grid: Survey and challenges. Communications in Computer and Information Science Geo-Spatial Knowledge and Intelligence, 55–66 (2018). doi:[10.1007/978-981-13-0893-2_7](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0893-2_7)
- [33] Sauerbier, T.: Theorie und Praxis von Simulationssystemen Eine Einfuhrung Fur Ingenieure und Informatiker ; MIT Programmbeispielen und Projekten aus der Technik. Vieweg, (1999)
- [34] Dangelmaier, W., Laroque, C.: Simulation. <https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/technologien-methoden/Operations-Research/Simulation/index.html> Accessed 2021-11-26
- [35] Markowitz, H.M., Hausner, B., Karr, H.W.: SIMSCRIPT: A Simulation Programming Language (1961). https://www.rand.org/pubs/research_memoranda/RM3310.html
- [36] Gordon, G.: The development of the general purpose simulation system (gps). The first ACM SIGPLAN conference on History of programming languages - HOPL-1 (1978). doi:[10.1145/800025.808382](https://doi.org/10.1145/800025.808382)
- [37] Schwetman, H.: Csim. Proceedings of the 18th conference on Winter simulation - WSC 86 (1986). doi:[10.1145/318242.318464](https://doi.org/10.1145/318242.318464)
- [38] Dahl, O.-J., Nygaard, K.: Simula: an algol-based simulation language. Communications of the ACM **9**(9), 671–678 (1966). doi:[10.1145/365813.365819](https://doi.org/10.1145/365813.365819)
- [39] Buxton, J.N., Laski, J.G.: Control and simulation language. The Computer Journal **5**(3), 194–199 (1962). doi:[10.1093/comjnl/5.3.194](https://doi.org/10.1093/comjnl/5.3.194)
- [40] Plant Simulation (2021). <https://plant-simulation.de/> Accessed 2021-11-11
- [41] Simulation Software: Engineering in the Cloud (2021). <https://www.simscale.com/> Accessed 2021-11-11
- [42] Enterprise Dynamics® (2020). <https://www.incontrolsim.com/produkte/enterprise-dynamics/?lang=de> Accessed 2021-11-11
- [43] Jeong, Y., Singh, A., Zafarzadeh, M., Wiktorsson, M., Hauge, J.B.: Data-driven manufacturing simulation: Towards a cps-based approach. Advances in Transdisciplinary Engineering SPS2020 (2020). doi:[10.3233/atde200197](https://doi.org/10.3233/atde200197)
- [44] Merkle, L., Segura, A.S., Grummel, J.T., Lienkamp, M.: Architecture of a digital twin for enabling digital services for battery systems. 2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS) (2019). doi:[10.1109/icphys.2019.8780347](https://doi.org/10.1109/icphys.2019.8780347)

- [45] Grösser, P.D.S.: Definition: Digitaler Zwilling. Springer. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitaler-zwilling-54371> Accessed 2021-11-13
- [46] Jiang, Y., Song, H., Wang, R., Gu, M., Sun, J., Sha, L.: Data-centered runtime verification of wireless medical cyber-physical system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* **13**(4), 1900–1909 (2017). doi:10.1109/tii.2016.2573762
- [47] Iannino, V., Colla, V., Denker, J., Götttsche, M.: A cps-based simulation platform for long production factories. *Metals* **9**(10), 1025 (2019). doi:10.3390/met9101025
- [48] EPANet. <http://epanet.de/> Accessed 2021-11-11
- [49] Lin, J., Sedigh, S., Miller, A.: Towards integrated simulation of cyber-physical systems: A case study on intelligent water distribution. 2009 Eighth IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (2009). doi:10.1109/dasc.2009.140
- [50] Imen, S., Chang, N.-B.: Developing a cyber-physical system for smart and sustainable drinking water infrastructure management. 2016 IEEE 13th International Conference on Networking, Sensing, and Control (ICNSC) (2016). doi:10.1109/icnsc.2016.7478983
- [51] Vogt, M., Marten, F., Braun, M.: A survey and statistical analysis of smart grid co-simulations. Elsevier (2018). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918304616>
- [52] DigSILENT. <https://www.digsilent.de/de/> Accessed 2021-11-11
- [53] Software für die Stromnetzsimulation Stromnetzlösungen (2021). <https://www.opal-rt.com/de/power-systems-overview/> Accessed 2021-11-11
- [54] RTDS (2019). <https://www.rtds.com/> Accessed 2021-11-11
- [55] PowerWorldThe visual approach to electric power systems (2021). <https://www.powerworld.com/> Accessed 2021-11-11
- [56] OpenDSS. <https://www.epri.com/pages/sa/opensdss> Accessed 2021-11-11
- [57] The Next-Generation Simulation Software. <https://www.gridlabd.org/> Accessed 2021-11-11
- [58] Liljenstam, M., Liu, J., Nicol, D., Yuan, Y., Yan, G., Grier, C.: Rinse: The real-time immersive network simulation environment for network security exercises. Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation (PADS05). doi:10.1109/pads.2005.23
- [59] OPNET Network Simulator (2020). <https://opnetprojects.com/opnet-network-simulator/> Accessed 2021-11-11
- [60] Cao, Y., Li, Y., Liu, X., Rehtanz, C.: Cyber-physical energy and power systems (2020). doi:10.1007/978-981-15-0062-6

- [61] Hwang, I., Kim, S., Kim, Y., Seah, C.E.: A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **18**(3), 636–653 (2010). doi:[10.1109/tcst.2009.2026285](https://doi.org/10.1109/tcst.2009.2026285)
- [62] Birkmann, J.: State of the Art der Forschung zur Verwundbarkeit Kritischer Infrastrukturen am Beispiel Strom/Stromausfall. *Forschungsforum Öffentl. Sicherheit*, (2010)
- [63] Ferreira, E.F., Barros, J.D.: Faults monitoring system in the electric power grid of medium voltage. *Procedia Computer Science* **130**, 696–703 (2018). doi:[10.1016/j.procs.2018.04.123](https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.123)
- [64] Ajenikoko, G.A., Sangotola, S.O.: Power system faults: A hindrance to sustainability and reliability. *International Journal of Engineering Research* **3**(11), 700–703 (2014). doi:[10.17950/ijer/v3s11/1116](https://doi.org/10.17950/ijer/v3s11/1116)
- [65] Huaiguang, J., Jun, Z.J., Wenzhong, G., Ziping, W.: Fault Detection, Identification, and Location in Smart Grid Based on Data-Driven Computational Methods. <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6850055>
- [66] Gudzius, S., Markevicius, L.A., Morkvenas, A.: Characteristics of fault detection system for smart grid distribution network. *Electronics And Electrical Engineering* **112**(6) (2011). doi:[10.5755/j01.eee.112.6.461](https://doi.org/10.5755/j01.eee.112.6.461)
- [67] Rivas, A.E.L., Abrão, T.: Faults in smart grid systems: Monitoring, detection and classification. *Electric Power Systems Research* **189**, 106602 (2020). doi:[10.1016/j.epsr.2020.106602](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106602)
- [68] Chakraborty, S., Das, S.: Application of smart meters in high impedance fault detection on distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid* **10**(3), 3465–3473 (2019). doi:[10.1109/tsg.2018.2828414](https://doi.org/10.1109/tsg.2018.2828414)
- [69] Wang, B., Geng, J., Dong, X.: High-impedance fault detection based on nonlinear voltage–current characteristic profile identification. *IEEE Transactions on Smart Grid* **9**(4), 3783–3791 (2018). doi:[10.1109/tsg.2016.2642988](https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2642988)
- [70] Dhend, M.H., Chile, R.H.: Fault diagnosis of smart grid distribution system by using smart sensors and symlet wavelet function. *Journal of Electronic Testing* **33**(3), 329–338 (2017). doi:[10.1007/s10836-017-5658-9](https://doi.org/10.1007/s10836-017-5658-9)
- [71] Koziy, K., Gou, B., Aslakson, J.: A low-cost power-quality meter with series arc-fault detection capability for smart grid. *IEEE Transactions on Power Delivery* **28**(3), 1584–1591 (2013). doi:[10.1109/tpwrd.2013.2251753](https://doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2251753)
- [72] He, M., Zhang, J.: A dependency graph approach for fault detection and localization towards secure smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid* **2**(2), 342–351 (2011). doi:[10.1109/tsg.2011.2129544](https://doi.org/10.1109/tsg.2011.2129544)
- [73] Jiang, H., Dai, X., Gao, D.W., Zhang, J.J., Zhang, Y., Muljadi, E.: Spatial-temporal synchrophasor data characterization and analytics in smart grid fault detection, identification, and impact causal analysis. *IEEE Transactions on Smart Grid* **7**(5), 2525–2536 (2016). doi:[10.1109/tsg.2016.2552229](https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2552229)

- [74] Tang, Y., Yang, J.: Dynamic event monitoring using unsupervised feature learning towards smart grid big data. 2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) (2017). doi:[10.1109/ijcnn.2017.7966027](https://doi.org/10.1109/ijcnn.2017.7966027)
- [75] Chen, K., Hu, J., He, J.: Detection and classification of transmission line faults based on unsupervised feature learning and convolutional sparse autoencoder. IEEE Transactions on Smart Grid, 1–1 (2016). doi:[10.1109/tsg.2016.2598881](https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2598881)
- [76] Gharavi, H., Hu, B.: Space-time approach for disturbance detection and classification. IEEE Transactions on Smart Grid **9**(5), 5132–5140 (2018). doi:[10.1109/tsg.2017.2680742](https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2680742)
- [77] Santis, E.D., Rizzi, A., Sadeghian, A.: A cluster-based dissimilarity learning approach for localized fault classification in smart grids. Swarm and Evolutionary Computation **39**, 267–278 (2018). doi:[10.1016/j.swevo.2017.10.007](https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.10.007)
- [78] Chaitanya, B.k., Yadav, A.: An intelligent fault detection and classification scheme for distribution lines integrated with distributed generators. Computers Electrical Engineering **69**, 28–40 (2018). doi:[10.1016/j.compeleceng.2018.05.025](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.05.025)
- [79] pandas. <https://pandas.pydata.org/> Accessed 2021-10-09
- [80] Rwl: PYPOWER: Port of MATPOWER to Python. <https://github.com/rwl/PYPOWER>
- [81] Thurner, L., Scheidler, A., Schafer, F., Menke, J.-H., Dollichon, J., Meier, F., Meinecke, S., Braun, M.: Pandapower—an open-source python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems. IEEE Transactions on Power Systems **33**(6), 6510–6521 (2018). doi:[10.1109/tpwrs.2018.2829021](https://doi.org/10.1109/tpwrs.2018.2829021)
- [82] About-pandapower. <http://www.pandapower.org/about/> Accessed 2021-10-14
- [83] PSS@SINCAL – Software zur Analyse und Planung aller Arten von Energieversorgungsnetzen. <https://new.siemens.com/de/de/produkte/energie/energieautomatisierung-und-smart-grid/pss-software/pss-sincal.html> Accessed 2021-11-14
- [84] Schneider, K.P., Mather, B.A., Pal, B.C., Ten, C.-W., Shirek, G.J., Zhu, H., Fuller, J.C., Pereira, J.L.R., Ochoa, L.F., Araujo, L.R.D., et al.: Analytic considerations and design basis for the iee distribution test feeders. IEEE Transactions on Power Systems **33**(3), 3181–3188 (2018). doi:[10.1109/tpwrs.2017.2760011](https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2760011)
- [85] Power Systems Test Case Archive. <https://labs.ece.uw.edu/pstca/> Accessed 2021-12-14
- [86] Meinecke, S., Sarajlić, D., Drauz, S.R., Klettke, A., Lauven, L.-P., Rehtanz, C., Moser, A., Braun, M.: Simbench—a benchmark dataset of electric power systems to compare innovative solutions based on power flow analysis. Energies **13**(12), 3290 (2020). doi:[10.3390/en13123290](https://doi.org/10.3390/en13123290)
- [87] Witteriede, H.: Wissenschaftliches Arbeiten - Teil 3: Systematische Literaturrecherche (2019). www.katho-nrw.de/h.witteriede/swa Accessed 2021-12-19
- [88] Taft, J. Pacific Northwest National Laboratory (2017). https://gridarchitecture.pnnl.gov/media/white-papers/FaultIntelligence_PNNL.pdf

- [89] Sarathkumar, D., Srinivasan, M., Stonier, A.A., Samikannu, R., Dasari, N.R., Raj, R.A.: A technical review on classification of various faults in smart grid systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **1055**(1), 012152 (2021). doi:[10.1088/1757-899x/1055/1/012152](https://doi.org/10.1088/1757-899x/1055/1/012152)
- [90] Mar, A., Pereira, P., Martins, J.F.: A survey on power grid faults and their origins: A contribution to improving power grid resilience. *Energies* **12**(24), 4667 (2019). doi:[10.3390/en12244667](https://doi.org/10.3390/en12244667)
- [91] Ploski, J., Rohr, M., Schwenkenberg, P., Hasselbring, W.: Research issues in software fault categorization. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes* **32**(6), 6 (2007). doi:[10.1145/1317471.1317478](https://doi.org/10.1145/1317471.1317478)
- [92] Knuth, D.E.: The errors of tex. *Software: Practice and Experience* **19**(7), 607–685 (1989). doi:[10.1002/spe.4380190702](https://doi.org/10.1002/spe.4380190702)
- [93] Beizer, B.: *Software Testing Techniques*. International Thomson Computer Press, (1990)
- [94] Avižienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B.: Dependability and its threats: A taxonomy. *Building the Information Society IFIP International Federation for Information Processing*, 91–120. doi:[10.1007/978-1-4020-8157-6_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8157-6_13)
- [95] Powell, D., Stroud, R.: *Conceptual Model and Architecture for MAFTIA*. University of Newcastle upon Tyne, Computing Science, (2003)
- [96] Gabsi, W., Zalila, B.: Fault tolerance for distributed real time dynamically reconfigurable systems from modeling to implementation. *2013 Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises* (2013). doi:[10.1109/wetice.2013.41](https://doi.org/10.1109/wetice.2013.41)
- [97] Alonso, J., Grottke, M., Nikora, A.P., Trivedi, K.S.: The nature of the times to flight software failure during space missions. *2012 IEEE 23rd International Symposium on Software Reliability Engineering* (2012). doi:[10.1109/issre.2012.32](https://doi.org/10.1109/issre.2012.32)
- [98] Knüppel, K., Meyer, G., Nyhuis, P.: A universal approach to categorize failures in production. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* **8**, 240–243 (2014)
- [99] Chi, C.-F., Sigmund, D., Astaridi, M.O.: Classification scheme for root cause and failure modes and effects analysis (fmea) of passenger vehicle recalls. *Reliability Engineering System Safety* **200**, 106929 (2020). doi:[10.1016/j.res.2020.106929](https://doi.org/10.1016/j.res.2020.106929)
- [100] SINTEF. <https://www.sintef.no/en/> Accessed 2021-11-14
- [101] PDS Method and Handbooks (2021). <https://www.sintef.no/projectweb/pds-main-page/> Accessed 2021-11-25
- [102] Otuoze, A.O., Mustafa, M.W., Larik, R.M.: Smart grids security challenges: Classification by sources of threats. *Journal of Electrical Systems and Information Technology* **5**(3), 468–483 (2018). doi:[10.1016/j.jesit.2018.01.001](https://doi.org/10.1016/j.jesit.2018.01.001)

- [103] Madeti, S.R., Singh, S.n.: A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system. *Solar Energy* **158**, 161–185 (2017). doi:[10.1016/j.solener.2017.08.069](https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.069)
- [104] Davis, C.M., Tate, J.E., Okhravi, H., Grier, C., Overbye, T.J., Nicol, D.: Scada cyber security testbed development. 2006 38th North American Power Symposium (2006). doi:[10.1109/naps.2006.359615](https://doi.org/10.1109/naps.2006.359615)
- [105] Mallouhi, M., Al-Nashif, Y., Cox, D., Chadaga, T., Hariri, S.: A testbed for analyzing security of scada control systems (tasscs). *Isgt 2011* (2011). doi:[10.1109/isgt.2011.5759169](https://doi.org/10.1109/isgt.2011.5759169)
- [106] Chen, B., Butler-Purry, K.L., Goulart, A., Kundur, D.: Implementing a real-time cyber-physical system test bed in rtds and opnet. 2014 North American Power Symposium (NAPS) (2014). doi:[10.1109/naps.2014.6965381](https://doi.org/10.1109/naps.2014.6965381)
- [107] Ghaemi, S., Schneider, S.: Potential analysis of residential demand response using gridlab-d. *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (2013). doi:[10.1109/iecon.2013.6700477](https://doi.org/10.1109/iecon.2013.6700477)
- [108] Prejbeanu, R., Roman, M., Ivanov, V., Radu, A.: Simulation and fault detection techniques for multilevel inverters used in smart grids. 2020 21th International Carpathian Control Conference (ICCC) (2020). doi:[10.1109/iccc49264.2020.9257216](https://doi.org/10.1109/iccc49264.2020.9257216)
- [109] MATLAB. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [110] Stanovich, M.J., Leonard, I., Sanjeev, K., Steurer, M., Roth, T.P., Jackson, S., Bruce, M.: Development of a smart-grid cyber-physical systems testbed. 2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT) (2013). doi:[10.1109/isgt.2013.6497874](https://doi.org/10.1109/isgt.2013.6497874)
- [111] Steinbrink, C., Blank-Babazadeh, M., El-Ama, A., Holly, S., Lüers, B., Nebel-Wenner, M., Acosta, R.R., Raub, T., Schwarz, J., Stark, S., et al.: Cpes testing with mosaik: Co-simulation planning, execution and analysis. *Applied Sciences* **9**(5), 923 (2019). doi:[10.3390/app9050923](https://doi.org/10.3390/app9050923)
- [112] Balduin, S., Westermann, T., Puiutta, E.: Evaluating different machine learning techniques as surrogate for low voltage grids. *Energy Informatics* **3**(S1) (2020). doi:[10.1186/s42162-020-00127-3](https://doi.org/10.1186/s42162-020-00127-3)
- [113] Schutte, S., Scherfke, S., Troschel, M.: Mosaik: A framework for modular simulation of active components in smart grids. 2011 IEEE First International Workshop on Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS) (2011). doi:[10.1109/sgms.2011.6089027](https://doi.org/10.1109/sgms.2011.6089027)
- [114] Steinbrink, C., Meer, A.A.V.D., Cvetkovic, M., Babazadeh, D., Rohjans, S., Palensky, P., Lehnhoff, S.: Smart grid co-simulation with mosaik and hla: a comparison study. *Computer Science - Research and Development* **33**(1-2), 135–143 (2017). doi:[10.1007/s00450-017-0379-y](https://doi.org/10.1007/s00450-017-0379-y)
- [115] Papathanassiou, S., Hatziargyriou, N., Strunz, K., et al.: A benchmark low voltage micro-grid network. In: *Proceedings of the CIGRE Symposium: Power Systems with Dispersed Generation*, pp. 1–8 (2005). CIGRE

- [116] Thurner, L., Braun, M.: Vectorized calculation of short circuit currents considering distributed generation - an open source implementation of iec 60909. 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe) (2018). doi:10.1109/isgteurope.2018.8571529
- [117] Karim, I.A.: Fault analysis and detection techniques of solar cells and pv modules. 2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT) (2015). doi:10.1109/iceeict.2015.7307349
- [118] Kusiak, A., Verma, A.: Analyzing bearing faults in wind turbines: A data-mining approach. *Renewable Energy* **48**, 110–116 (2012). doi:10.1016/j.renene.2012.04.020
- [119] Literaturrecherche mit dem Schneeballsystem. <https://studi-lektor.de/tipps/literaturrecherche/schneeballsystem-literaturrecherche.html>
- [120] Farhangi, H.: The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine* **8**(1), 18–28 (2010). doi:10.1109/mpe.2009.934876
- [121] IEEEExplore. <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> Accessed 2022-2-14
- [122] Wiley Online Library. <https://onlinelibrary.wiley.com/> Accessed 2022-2-14
- [123] Ward, D.M.: The effect of weather on grid systems and the reliability of electricity supply. *Climatic Change* **121**(1), 103–113 (2013). doi:10.1007/s10584-013-0916-z. Accessed 2022-02-07
- [124] Kaitovic, I., Lukovic, S., Malek, M.: Proactive Failure Management in Smart Grids for Improved Resilience: A Methodology for Failure Prediction and Mitigation. In: 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), pp. 1–6. IEEE, San Diego, CA, USA (2015). doi:10.1109/GLOCOMW.2015.7414155. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7414155/> Accessed 2022-02-08
- [125] Liu, J., Xiao, Y., Li, S., Liang, W., Chen, C.L.P.: Cyber Security and Privacy Issues in Smart Grids. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **14**(4), 981–997 (2012). doi:10.1109/SURV.2011.122111.00145. Accessed 2022-02-09
- [126] Baldick, R., Chowdhury, B., Dobson, I., Zhaoyang Dong, Bei Gou, Hawkins, D., Huang, H., Joung, M., Kirschen, D., Fangxing Li, Juan Li, Zuyi Li, Chen-Ching Liu, Mili, L., Miller, S., Podmore, R., Schneider, K., Kai Sun, Wang, D., Zhigang Wu, Pei Zhang, Wenjie Zhang, Xiaoping Zhang: Initial review of methods for cascading failure analysis in electric power transmission systems IEEE PES CAMS task force on understanding, prediction, mitigation and restoration of cascading failures. In: 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1–8. IEEE, Pittsburgh, PA, USA (2008). doi:10.1109/PES.2008.4596430. <http://ieeexplore.ieee.org/document/4596430/> Accessed 2022-02-08
- [127] Tootaghaj, D.Z., Bartolini, N., Khamfroush, H., He, T., Chaudhuri, N.R., Porta, T.L.: Mitigation and Recovery From Cascading Failures in Interdependent Networks Under

- Uncertainty. *IEEE Transactions on Control of Network Systems* **6**(2), 501–514 (2019). doi:[10.1109/TCNS.2018.2843168](https://doi.org/10.1109/TCNS.2018.2843168). Accessed 2022-02-09
- [128] Ji, C., Wei, Y., Poor, H.V.: Resilience of Energy Infrastructure and Services: Modeling, Data Analytics, and Metrics. *Proceedings of the IEEE* **105**(7), 1354–1366 (2017). doi:[10.1109/JPROC.2017.2698262](https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2698262). Accessed 2022-02-17
- [129] Mar, A., Pereira, P., F. Martins, J.: A Survey on Power Grid Faults and Their Origins: A Contribution to Improving Power Grid Resilience. *Energies* **12**(24), 4667 (2019). doi:[10.3390/en12244667](https://doi.org/10.3390/en12244667). Number: 24 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Accessed 2022-02-11
- [130] Bie, Z., Lin, Y., Li, G., Li, F.: Battling the Extreme: A Study on the Power System Resilience. *Proceedings of the IEEE* **105**(7), 1253–1266 (2017). doi:[10.1109/JPROC.2017.2679040](https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2679040). Accessed 2022-02-08
- [131] Billinton, R., Singh, G.: Application of adverse and extreme adverse weather: modelling in transmission and distribution system reliability evaluation. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution* **153**(1), 115 (2006). doi:[10.1049/ip-gtd:20045058](https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20045058). Accessed 2022-02-08
- [132] Panteli, M., Trakas, D.N., Mancarella, P., Hatziargyriou, N.D.: Boosting the Power Grid Resilience to Extreme Weather Events Using Defensive Islanding. *IEEE Transactions on Smart Grid* **7**(6), 2913–2922 (2016). doi:[10.1109/TSG.2016.2535228](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2535228). Accessed 2022-02-08
- [133] Colak, I., Sagiroglu, S., Fulli, G., Yesilbudak, M., Covrig, C.-F.: A survey on the critical issues in smart grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **54**, 396–405 (2016). doi:[10.1016/j.rser.2015.10.036](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.036). Accessed 2022-02-08
- [134] Abi-Samra, N.C., Malcolm, W.P.: Extreme weather effects on power systems. In: 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1–5. IEEE, San Diego, CA (2011). doi:[10.1109/PES.2011.6039594](https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039594). <https://ieeexplore.ieee.org/document/6039594/> Accessed 2022-02-02
- [135] Panteli, M., Mancarella, P.: Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies. *Electric Power Systems Research* **127**, 259–270 (2015). doi:[10.1016/j.epsr.2015.06.012](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.012). Accessed 2022-02-07
- [136] Hare, J., Shi, X., Gupta, S., Bazzi, A.: Fault diagnostics in smart micro-grids: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **60**, 1114–1124 (2016). doi:[10.1016/j.rser.2016.01.122](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.122). Accessed 2022-02-17
- [137] Caramia, P., Di Mambro, E., Varilone, P., Verde, P.: Impact of Distributed Generation on the Voltage Sag Performance of Transmission Systems. *Energies* **10**(7), 959 (2017). doi:[10.3390/en10070959](https://doi.org/10.3390/en10070959). Accessed 2022-02-11
- [138] Papic, M., Bell, K., Chen, Y., Dobson, I., Fonte, L., Haq, E., Hines, P., Kirschen, D., Luo, X., Miller, S.S., Samaan, N., Vaiman, M., Varghese, M., Zhang, P.: Survey of tools for

- risk assessment of cascading outages. In: 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1–9. IEEE, San Diego, CA (2011). doi:[10.1109/PES.2011.6039371](https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039371). <https://ieeexplore.ieee.org/document/6039371/> Accessed 2022-02-09
- [139] Peiravi, A., Ildarabadi, R.: A Fast Algorithm for Intentional Islanding of Power Systems Using the Multilevel Kernel k-Means Approach. *Journal of Applied Sciences* **9**(12), 2247–2255 (2009). doi:[10.3923/jas.2009.2247.2255](https://doi.org/10.3923/jas.2009.2247.2255). Accessed 2022-02-10
- [140] Cadini, F., Agliardi, G.L., Zio, E.: A modeling and simulation framework for the reliability/availability assessment of a power transmission grid subject to cascading failures under extreme weather conditions. *Applied Energy* **185**, 267–279 (2017). doi:[10.1016/j.apenergy.2016.10.086](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.086). Accessed 2022-02-11
- [141] Hare, J., Shi, X., Gupta, S., Bazzi, A.: A review of faults and fault diagnosis in micro-grids electrical energy infrastructure. In: 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 3325–3332. IEEE, Pittsburgh, PA, USA (2014). doi:[10.1109/ECCE.2014.6953852](https://doi.org/10.1109/ECCE.2014.6953852). <http://ieeexplore.ieee.org/document/6953852/> Accessed 2022-02-09
- [142] Singh, N., Gupta, A.: A study on mitigation of blackout risks in smart grid. In: 2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE), pp. 1–4. IEEE, Patiala, India (2016). doi:[10.1109/IICPE.2016.8079529](https://doi.org/10.1109/IICPE.2016.8079529). <http://ieeexplore.ieee.org/document/8079529/> Accessed 2022-02-17
- [143] Andersson, G., Donalek, P., Farmer, R., Hatziargyriou, N., Kamwa, I., Kundur, P., Martins, N., Paserba, J., Pourbeik, P., Sanchez-Gasca, J., Schulz, R., Stankovic, A., Taylor, C., Vittal, V.: Causes of the 2003 Major Grid Blackouts in North America and Europe, and Recommended Means to Improve System Dynamic Performance. *IEEE Transactions on Power Systems* **20**(4), 1922–1928 (2005). doi:[10.1109/TPWRS.2005.857942](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.857942). Accessed 2022-02-08
- [144] Kim, M.-S., Haider, R., Cho, G.-J., Kim, C.-H., Won, C.-Y., Chai, J.-S.: Comprehensive Review of Islanding Detection Methods for Distributed Generation Systems. *Energies* **12**(5), 837 (2019). doi:[10.3390/en12050837](https://doi.org/10.3390/en12050837). Accessed 2022-02-10
- [145] Quirós-Tortós, J., Sánchez-García, R., Brodzki, J., Bialek, J., Terzija, V.: Constrained spectral clustering-based methodology for intentional controlled islanding of large-scale power systems. *IET Generation, Transmission & Distribution* **9**(1), 31–42 (2015). doi:[10.1049/iet-gtd.2014.0228](https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0228). Accessed 2022-02-10
- [146] Chen, C., Wang, J., Ton, D.: Modernizing Distribution System Restoration to Achieve Grid Resiliency Against Extreme Weather Events: An Integrated Solution. *Proceedings of the IEEE* **105**(7), 1267–1288 (2017). doi:[10.1109/JPROC.2017.2684780](https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2684780). Accessed 2022-02-08
- [147] Li, Z., Shahidehpour, M., Aminifar, F., Alabdulwahab, A., Al-Turki, Y.: Networked Microgrids for Enhancing the Power System Resilience. *Proceedings of the IEEE* **105**(7), 1289–1310 (2017). doi:[10.1109/JPROC.2017.2685558](https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2685558). Accessed 2022-02-08

- [148] Chang, L., Wu, Z.: Performance and reliability of electrical power grids under cascading failures. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **33**(8), 1410–1419 (2011). doi:[10.1016/j.ijepes.2011.06.021](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.06.021). Accessed 2022-02-11
- [149] Esmailian, A., Kezunovic, M.: Prevention of Power Grid Blackouts Using Intentional Islanding Scheme. *IEEE Transactions on Industry Applications* **53**(1), 622–629 (2017). doi:[10.1109/TIA.2016.2614772](https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2614772). Accessed 2022-02-10
- [150] Prostejovsky, A.M., Brosinsky, C., Heussen, K., Westermann, D., Kreusel, J., Marinelli, M.: The future role of human operators in highly automated electric power systems. *Electric Power Systems Research* **175**, 105883 (2019). doi:[10.1016/j.epsr.2019.105883](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105883). Accessed 2022-02-09
- [151] Pagani, G.A., Aiello, M.: The Power Grid as a complex network: A survey. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **392**(11), 2688–2700 (2013). doi:[10.1016/j.physa.2013.01.023](https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.01.023). Accessed 2022-02-09
- [152] Vaiman, Bell, Chen, Chowdhury, Dobson, Hines, Papic, Miller, Zhang: Risk Assessment of Cascading Outages: Methodologies and Challenges. *IEEE Transactions on Power Systems* **27**(2), 631–641 (2012). doi:[10.1109/TPWRS.2011.2177868](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2177868). Accessed 2022-02-08
- [153] Golari, M., Fan, N., Wang, J.: Large-scale stochastic power grid islanding operations by line switching and controlled load shedding. *Energy Systems* **8**(3), 601–621 (2017). doi:[10.1007/s12667-016-0215-7](https://doi.org/10.1007/s12667-016-0215-7). Accessed 2022-02-09
- [154] Hines, P., Apt, J., Talukdar, S.: Large blackouts in North America: Historical trends and policy implications. *Energy Policy* **37**(12), 5249–5259 (2009). doi:[10.1016/j.enpol.2009.07.049](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.049). Accessed 2022-02-07
- [155] Marzband, M., Moghaddam, M.M., Akorede, M.F., Khomeyrani, G.: Adaptive load shedding scheme for frequency stability enhancement in microgrids. *Electric Power Systems Research* **140**, 78–86 (2016). doi:[10.1016/j.epsr.2016.06.037](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.037). Accessed 2022-02-09
- [156] Jufri, F., Kim, J.-S., Jung, J.: Analysis of Determinants of the Impact and the Grid Capability to Evaluate and Improve Grid Resilience from Extreme Weather Event. *Energies* **10**, 1779 (2017). doi:[10.3390/en10111779](https://doi.org/10.3390/en10111779)
- [157] Medicine, E., of Sciences, N.A., Sciences, D.o.E.a.P., Systems, B.o.E.a.E., System, C.o.E.t.R.o.t.N.E.P.T.a.D.: Enhancing the Resilience of the Nation’s Electricity System. National Academies Press, (2017). Google-Books-ID: 8bE3DwAAQBAJ
- [158] Wang, Y., Chen, C., Wang, J., Baldick, R.: Research on Resilience of Power Systems Under Natural Disasters—A Review. *IEEE Transactions on Power Systems* **31**(2), 1604–1613 (2016). doi:[10.1109/TPWRS.2015.2429656](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2429656). Accessed 2022-02-08
- [159] Zhu, Y., Yan, J., Tang, Y., Sun, Y.L., He, H.: Resilience Analysis of Power Grids Under the Sequential Attack. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* **9**(12), 2340–2354 (2014). doi:[10.1109/TIFS.2014.2363786](https://doi.org/10.1109/TIFS.2014.2363786). Accessed 2022-02-09

- [160] Hines, P., Balasubramaniam, K., Sanchez, E.C.: Cascading failures in power grids. *IEEE Potentials* **28**(5), 24–30 (2009). doi:[10.1109/MPOT.2009.933498](https://doi.org/10.1109/MPOT.2009.933498). Accessed 2022-02-17
- [161] Baran, M.E., Mahajan, N.R.: Overcurrent Protection on Voltage-Source-Converter-Based Multiterminal DC Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery* **22**(1), 406–412 (2007). doi:[10.1109/TPWRD.2006.877086](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.877086). Accessed 2022-02-10
- [162] Hosseini, S., Barker, K., Ramirez-Marquez, J.E.: A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety* **145**, 47–61 (2016). doi:[10.1016/j.res.2015.08.006](https://doi.org/10.1016/j.res.2015.08.006). Accessed 2022-02-17
- [163] Crucitti, P., Latora, V., Marchiori, M.: Model for cascading failures in complex networks. *Physical Review E* **69**(4), 045104 (2004). doi:[10.1103/PhysRevE.69.045104](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.045104). Accessed 2022-02-17
- [164] Castillo, A.: Risk analysis and management in power outage and restoration: A literature survey. *Electric Power Systems Research* **107**, 9–15 (2014). doi:[10.1016/j.epr.2013.09.002](https://doi.org/10.1016/j.epr.2013.09.002). Accessed 2022-02-02
- [165] Shinozuka, M., Dong, X., Chen, T.C., Jin, X.: Seismic performance of electric transmission network under component failures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **36**(2), 227–244 (2007). doi:[10.1002/eqe.627](https://doi.org/10.1002/eqe.627). Accessed 2022-02-08
- [166] McClure, G., Langlois, S., Rogier, J.: Understanding How Overhead Lines Respond to Localized High Intensity Wind Storms. In: *Structures Congress 2008*, pp. 1–10. American Society of Civil Engineers, Vancouver, British Columbia, Canada (2008). doi:[10.1061/41016\(314\)192](https://doi.org/10.1061/41016(314)192).
- [167] Shiwen, Y., Hui, H., Chengzhi, W., Hao, G., Hao, F.: Review on Risk Assessment of Power System. *Procedia Computer Science* **109**, 1200–1205 (2017). doi:[10.1016/j.procs.2017.05.399](https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.399). Accessed 2022-02-09
- [168] Warnier, M., Dulman, S., Koç, Y., Pauwels, E.: Distributed monitoring for the prevention of cascading failures in operational power grids. *International Journal of Critical Infrastructure Protection* **17**, 15–27 (2017). doi:[10.1016/j.ijcip.2017.03.003](https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2017.03.003). Accessed 2022-02-17
- [169] Araneda, J.C., Rudnick, H., Mocarquer, S., Miquel, P.: Lessons from the 2010 Chilean earthquake and its impact on electricity supply. In: *2010 International Conference on Power System Technology*, pp. 1–7. IEEE, Zhejiang, Zhejiang, China (2010). doi:[10.1109/POWERCON.2010.5666023](https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666023). <http://ieeexplore.ieee.org/document/5666023/> Accessed 2022-02-08
- [170] Kezunovic, M.: Smart Fault Location for Smart Grids. *IEEE Transactions on Smart Grid* **2**(1), 11–22 (2011). doi:[10.1109/TSG.2011.2118774](https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2118774). Accessed 2022-02-10
- [171] Madureira, A., Gouveia, C., Moreira, C., Seca, L., Lopes, J.P.: Coordinated management of distributed energy resources in electrical distribution systems. In: *2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*, pp. 1–8. IEEE, Sao Paulo (2013). doi:[10.1109/ISGT-LA.2013.6554446](https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2013.6554446). <http://ieeexplore.ieee.org/document/6554446/> Accessed 2022-02-09

- [172] Mohammadi, P., El-Kishyky, H., Abdel-Akher, M., Abdel-Salam, M.: The impacts of distributed generation on fault detection and voltage profile in power distribution networks. In: 2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), pp. 191–196. IEEE, Santa Fe, NM, USA (2014). doi:[10.1109/IPMHVC.2014.7287241](https://doi.org/10.1109/IPMHVC.2014.7287241). <http://ieeexplore.ieee.org/document/7287241/> Accessed 2022-02-11
- [173] Xue, S.-M., Liu, C.: Line-to-Line Fault Analysis and Location in a VSC-Based Low-Voltage DC Distribution Network. *Energies* **11**(3), 536 (2018). doi:[10.3390/en11030536](https://doi.org/10.3390/en11030536). Accessed 2022-02-10
- [174] Mills, B., Unrau, D., Pentelow, L., Spring, K.: Assessment of lightning-related damage and disruption in Canada. *Natural Hazards* **52**(2), 481–499 (2010). doi:[10.1007/s11069-009-9391-2](https://doi.org/10.1007/s11069-009-9391-2). Accessed 2022-02-08
- [175] Norshahrani, M., Mokhlis, H., Abu Bakar, A., Jamian, J., Sukumar, S.: Progress on Protection Strategies to Mitigate the Impact of Renewable Distributed Generation on Distribution Systems. *Energies* **10**(11), 1864 (2017). doi:[10.3390/en10111864](https://doi.org/10.3390/en10111864). Accessed 2022-02-11
- [176] Zhu, Y., Zheng, T., Wang, M., Zhao, H., Wang, X.: An Improved Directional Relay Adapted to a Distribution Network with IIG Integration. *Energies* **12**(17), 3345 (2019). doi:[10.3390/en12173345](https://doi.org/10.3390/en12173345). Accessed 2022-02-10
- [177] Nuti, C., Rasulo, A., Vanzi, I.: Seismic safety evaluation of electric power supply at urban level. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **36**(2), 245–263 (2007). doi:[10.1002/eqe.622](https://doi.org/10.1002/eqe.622). Accessed 2022-02-08
- [178] Xu, Y., Liu, C.-C., Schneider, K.P., Ton, D.T.: Toward a resilient distribution system. In: 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1–5. IEEE, Denver, CO, USA (2015). doi:[10.1109/PESGM.2015.7286551](https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286551). <http://ieeexplore.ieee.org/document/7286551/> Accessed 2022-02-08
- [179] Abi-Samra, N.C., Forsten, K.R., Entriken, R.: Sample Effects of extreme weather on power systems and components, part I: Sample effects on distribution systems. In: IEEE PES General Meeting, pp. 1–3. IEEE, Minneapolis, MN (2010). doi:[10.1109/PES.2010.5589834](https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589834). <http://ieeexplore.ieee.org/document/5589834/> Accessed 2022-02-17
- [180] Khodaei, A.: Resiliency-Oriented Microgrid Optimal Scheduling. *IEEE Transactions on Smart Grid* **5**(4), 1584–1591 (2014). doi:[10.1109/TSG.2014.2311465](https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2311465). Accessed 2022-02-10
- [181] Project jupyter. <https://jupyter.org/> Accessed 2022-2-14
- [182] Microsoft: Visual studio code - code editing. redefined. Microsoft (2021). <https://code.visualstudio.com/> Accessed 2022-2-14
- [183] Datensätze (2022). <https://simbench.de/de/datensaetze/> Accessed 2022-2-14
- [184] Meinecke, S., Sarajlić, D., Drauz, S.R., Klettke, A., Lauven, L.-P., Rehtanz, C., Moser, A., Braun, M.: Simbench—a benchmark dataset of electric power systems to compare innovative solutions based on power flow analysis. *Energies* **13**(12), 3290 (2020). doi:[10.3390/en13123290](https://doi.org/10.3390/en13123290)

- [185] Prakash, E.S.: Electrical fault detection and classification (2021). <https://www.kaggle.com/datasets/esathyaparakash/electrical-fault-detection-and-classification>
- [186] Jamil, M., Sharma, S.K., Singh, R.: Fault detection and classification in electrical power transmission system using artificial neural network. SpringerPlus **4**(1) (2015). doi:10.1186/s40064-015-1080-x
- [187] Kaggle, Your machine learning and Data Science Community. <https://www.kaggle.com/> Accessed 2022-2-14
- [188] Mohammadi, F., Nazri, G.-A., Saif, M.: A fast fault detection and identification approach in power distribution systems. 2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET) (2019). doi:10.1109/pgsret.2019.8882676
- [189] IEEE 13 node Test Feeder. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/ieee-13-node-test-feeder.html;jsessionid=17a1ae9fad3f32e7a0ddad6e6272>
- [190] Eikeland, O.F., Holmstrand, I.S., Bakkejord, S., Chiesa, M., Bianchi, F.M.: Detecting and interpreting faults in vulnerable power grids with machine learning. IEEE Access **9**, 150686–150699 (2021). doi:10.1109/ACCESS.2021.3127042
- [191] Eikeland, O.F., Maria Bianchi, F., Holmstrand, I.S., Bakkejord, S., Santos, S., Chiesa, M.: Uncovering contributing factors to interruptions in the power grid: An arctic case. Energies **15**(1), 305 (2022). doi:10.3390/en15010305
- [192] Timeseries Module overview. https://pandapower.readthedocs.io/en/v2.9.0/timeseries/timeseries_loop.html Accessed 2021-09-12
- [193] Mirsaeidi, S., Dong, X.: An Integrated Control and Protection Scheme to Inhibit Blackouts Caused by Cascading Fault in Large-Scale Hybrid AC/DC Power Grids. IEEE Transactions on Power Electronics **34**(8), 7278–7291 (2019). doi:10.1109/TPEL.2018.2881720. Conference Name: IEEE Transactions on Power Electronics
- [194] Dong, X., Guan, E., Jing, L., Wang, H., Mirsaeidi, S.: Simulation and analysis of cascading faults in hybrid AC/DC power grids. International Journal of Electrical Power & Energy Systems **115**, 105492 (2020). doi:10.1016/j.ijepes.2019.105492. Accessed 2022-02-21
- [195] Chul-Hwan Kim, Hyun Kim, Young-Hun Ko, Sung-Hyun Byun, Aggarwal, R.K., Johns, A.T.: A novel fault-detection technique of high-impedance arcing faults in transmission lines using the wavelet transform. IEEE Transactions on Power Delivery **17**(4), 921–929 (2002). doi:10.1109/TPWRD.2002.803780. Accessed 2022-02-14
- [196] Michishita, K., Hongo, Y.: Flashover Rate of 6.6-kV Distribution Line Due to Direct Negative Lightning Return Strokes. IEEE Transactions on Power Delivery **27**(4), 2203–2210 (2012). doi:10.1109/TPWRD.2012.2212214. Accessed 2022-02-14
- [197] Zhang, W., Jing, Y., Xiao, X.: Model-Based General Arcing Fault Detection in Medium-Voltage Distribution Lines. IEEE Transactions on Power Delivery **31**(5), 2231–2241 (2016). doi:10.1109/TPWRD.2016.2518738. Accessed 2022-02-14

- [198] Bjerkan, E., As, N., Høidalen, H.K., Hernes, J.G.: RELIABLE DETECTION OF DOWNED AND BROKEN CONDUCTORS (0571), 5 (2007)
- [199] Kadechkar, A., Riba, J.-R., Moreno-Eguilaz, M., Sanllehí, J.: Real-Time Wireless, Contactless, and Coreless Monitoring of the Current Distribution in Substation Conductors for Fault Diagnosis. *IEEE Sensors Journal* **19**(5), 1693–1700 (2019). doi:[10.1109/JSEN.2018.2884566](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2884566). Conference Name: IEEE Sensors Journal
- [200] Ghosh, P., Karsai, G.: An Integrated Cyber-Physical Fault Management Approach. In: 2020 IEEE 23rd International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC), pp. 148–149 (2020). doi:[10.1109/ISORC49007.2020.00032](https://doi.org/10.1109/ISORC49007.2020.00032). ISSN: 2375-5261
- [201] Rawlins, C.B.: Analysis of Conductor Galloping Field Observations - Single Conductors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-100**(8), 3744–3753 (1981). doi:[10.1109/TPAS.1981.317017](https://doi.org/10.1109/TPAS.1981.317017). Conference Name: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
- [202] Huang, X., Zhao, L., Chen, G.: Design of a Wireless Sensor Module for Monitoring Conductor Galloping of Transmission Lines. *Sensors* **16**(10), 1657 (2016). doi:[10.3390/s16101657](https://doi.org/10.3390/s16101657). Number: 10 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Accessed 2022-02-17
- [203] Egbert, R.I.: Estimation of Maximum Amplitudes of Conductor Galloping by Describing Function Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery* **1**(1), 251–257 (1986). doi:[10.1109/TPWRD.1986.4307916](https://doi.org/10.1109/TPWRD.1986.4307916). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery
- [204] Bhatia, R.K., Bodade, V.: Defining the framework for wireless-AMI security in smart grid. In: 2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE), pp. 1–5 (2014). doi:[10.1109/ICGCCEE.2014.6921383](https://doi.org/10.1109/ICGCCEE.2014.6921383)
- [205] Khan, F., Rehman, A.u., Arif, M., Aftab, M., Jadoon, B.K.: A survey of communication technologies for smart grid connectivity. In: 2016 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube), pp. 256–261 (2016). doi:[10.1109/ICECUBE.2016.7495234](https://doi.org/10.1109/ICECUBE.2016.7495234)
- [206] Suci, G., Sachian, M.-A., Dobrea, M., Istrate, C.-I., Petrache, A.L., Vulpe, A., Vochin, M.: Securing the Smart Grid: A Blockchain-based Secure Smart Energy System. In: 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), pp. 1–5 (2019). doi:[10.1109/UPEC.2019.8893484](https://doi.org/10.1109/UPEC.2019.8893484)
- [207] Faza, A.Z., Sedigh, S., McMillin, B.M.: Reliability Analysis for the Advanced Electric Power Grid: From Cyber Control and Communication to Physical Manifestations of Failure. In: Buth, B., Rabe, G., Seyfarth, T. (eds.) *Computer Safety, Reliability, and Security. Lecture Notes in Computer Science*, pp. 257–269. Springer, Berlin, Heidelberg (2009). doi:[10.1007/978-3-642-04468-7_21](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04468-7_21)

- [208] Djuric, M.B., Terzija, C.V.: A new approach to the arcing faults detection for fast autoreclosure in transmission systems. *IEEE Transactions on Power Delivery* **10**(4), 1793–1798 (1995). doi:[10.1109/61.473378](https://doi.org/10.1109/61.473378). Accessed 2022-02-14
- [209] Sultan, A.F., Swift, G.W., Fedirchuk, D.J.: Detecting arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle asymmetry. *IEEE Transactions on Power Delivery* **9**(1), 461–470 (1994). doi:[10.1109/61.277718](https://doi.org/10.1109/61.277718). Accessed 2022-02-14
- [210] Kandanaarachchi, S., Anantharama, N., Munoz, M.A.: Early Detection of Vegetation Ignition Due to Powerline Faults. *IEEE Transactions on Power Delivery* **36**(3), 1324–1334 (2021). doi:[10.1109/TPWRD.2020.3006553](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3006553). Accessed 2022-02-14
- [211] Friberg, G., Pietsch, G.J.: Calculation of pressure rise due to arcing faults. *IEEE Transactions on Power Delivery* **14**(2), 365–370 (1999). doi:[10.1109/61.754075](https://doi.org/10.1109/61.754075). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery
- [212] Emanuel, A.E., Gulachenski, E.M.: DISTRIBUTION FEEDERS: CONTRIBUTIONS TO THE EVALUATION OF THE LOW FREQUENCY SPECTRUM, 12
- [213] Drouet, M.G., Nadeau, F.: Pressure Waves Due to Arcing Faults in a Substation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-98**(5), 1632–1635 (1979). doi:[10.1109/TPAS.1979.319480](https://doi.org/10.1109/TPAS.1979.319480). Conference Name: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
- [214] Abdrabou, A., Gaouda, A.M.: Uninterrupted Wireless Data Transfer for Smart Grids in the Presence of High Power Transients. *IEEE Systems Journal* **9**(2), 567–577 (2015). doi:[10.1109/JSYST.2013.2265179](https://doi.org/10.1109/JSYST.2013.2265179). Conference Name: IEEE Systems Journal
- [215] Dennetière, S., Saad, H., Clerc, B., Mahseredjian, J.: Setup and performances of the real-time simulation platform connected to the INELFE control system. *Electric Power Systems Research* **138**, 180–187 (2016). doi:[10.1016/j.epsr.2016.03.008](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.03.008). Accessed 2022-02-17
- [216] Zhang, Y., Ding, X., Liu, Y., Griffin, P.J.: An artificial neural network approach to transformer fault diagnosis. *IEEE Transactions on Power Delivery* **11**(4), 1836–1841 (1996). doi:[10.1109/61.544265](https://doi.org/10.1109/61.544265). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery
- [217] Sun, Y.-j., Zhang, S., Miao, C.-x., Li, J.-m.: Improved BP Neural Network for Transformer Fault Diagnosis. *Journal of China University of Mining and Technology* **17**(1), 138–142 (2007). doi:[10.1016/S1006-1266\(07\)60029-7](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(07)60029-7). Accessed 2022-02-17
- [218] Vaagensmith, B., McJunkin, T., Vedros, K., Reeves, J., Wayment, J., Boire, L., Rieger, C., Case, J.: An Integrated Approach to Improving Power Grid Reliability: Merging of Probabilistic Risk Assessment with Resilience Metrics. In: 2018 Resilience Week (RWS), pp. 139–146 (2018). doi:[10.1109/RWEEK.2018.8473500](https://doi.org/10.1109/RWEEK.2018.8473500)
- [219] Cao, Y., Gu, X., Jin, Q.: Infrared technology in the fault diagnosis of substation equipment. In: 2008 China International Conference on Electricity Distribution, pp. 1–6 (2008). doi:[10.1109/CICED.2008.5211792](https://doi.org/10.1109/CICED.2008.5211792). ISSN: 2161-749X

- [220] Xuehai, G., Jinliang, H.: Electromagnetic Interference on Secondary Systems of Substation Caused by Short-circuit Fault. In: 2007 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 206–211 (2007). doi:[10.1109/ELMAGC.2007.4413467](https://doi.org/10.1109/ELMAGC.2007.4413467). ISSN: 2158-1118
- [221] Taul, M.G., Wang, X., Davari, P., Blaabjerg, F.: An Overview of Assessment Methods for Synchronization Stability of Grid-Connected Converters Under Severe Symmetrical Grid Faults. *IEEE Transactions on Power Electronics* **34**(10), 9655–9670 (2019). doi:[10.1109/TPEL.2019.2892142](https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2892142). Conference Name: IEEE Transactions on Power Electronics
- [222] Han, Y., Feng, Y., Yang, P., Xu, L., Xu, Y., Blaabjerg, F.: Cause, Classification of Voltage Sag, and Voltage Sag Emulators and Applications: A Comprehensive Overview. *IEEE Access* **8**, 1922–1934 (2020). doi:[10.1109/ACCESS.2019.2958965](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958965). Conference Name: IEEE Access
- [223] Singh, M., Chandra, A.: Power maximization and voltage sag/swell ride-through capability of PMSG based variable speed wind energy conversion system. In: 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, pp. 2206–2211 (2008). doi:[10.1109/IECON.2008.4758299](https://doi.org/10.1109/IECON.2008.4758299). ISSN: 1553-572X
- [224] Yazdani, A., Sepahvand, H., Crow, M.L., Ferdowsi, M.: Fault Detection and Mitigation in Multilevel Converter STATCOMs. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **58**(4), 1307–1315 (2011). doi:[10.1109/TIE.2010.2050415](https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2050415). Conference Name: IEEE Transactions on Industrial Electronics
- [225] Ambusaidi, K., Pickert, V., Zahawi, B.: New Circuit Topology for Fault Tolerant H-Bridge DC–DC Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics* **25**(6), 1509–1516 (2010). doi:[10.1109/TPEL.2009.2038217](https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2038217). Conference Name: IEEE Transactions on Power Electronics
- [226] Fan, Z., Liu, X.: A novel universal grid voltage sag detection algorithm. In: 2012 Power Engineering and Automation Conference, pp. 1–4 (2012). doi:[10.1109/PEAM.2012.6612532](https://doi.org/10.1109/PEAM.2012.6612532)
- [227] Jan, S., Afzal, R., Khan, A.: Transformer Failures, Causes & Impact. In: International Conference Data Mining, Civil and Mechanical Engineering (ICDMCME'2015) Feb. 1-2, 2015 Bali (Indonesia). International Institute of Engineers, (2015). doi:[10.15242/IIE.E0215039](https://doi.org/10.15242/IIE.E0215039). <http://iieng.org/siteadmin/upload/8693E0215039.pdf> Accessed 2022-02-17
- [228] Zhang, D., Li, W., Xiong, X.: Overhead Line Preventive Maintenance Strategy Based on Condition Monitoring and System Reliability Assessment. *IEEE Transactions on Power Systems* **29**(4), 1839–1846 (2014). doi:[10.1109/TPWRS.2013.2295379](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2295379). Accessed 2022-02-16
- [229] Jamehbozorg, A., Shahrtash, S.M.: A Decision Tree-Based Method for Fault Classification in Double-Circuit Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery* **25**(4), 2184–2189 (2010). doi:[10.1109/TPWRD.2010.2050911](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2050911). Accessed 2022-02-16
- [230] Li, W., Song, H., Zeng, F.: Policy-Based Secure and Trustworthy Sensing for Internet of Things in Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal* **5**(2), 716–723 (2018). doi:[10.1109/JIOT.2017.2720635](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2720635). Conference Name: IEEE Internet of Things Journal

- [231] Elliot, P.j., Whiteley, R.h.: The measurement of smoke production from electrical wires under conditions of current overload. *Fire and Materials* **24**(6), 259–263 (2000). doi:[10.1002/1099-1018\(200011/12\)24:6<259::AID-FAM745>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1099-1018(200011/12)24:6<259::AID-FAM745>3.0.CO;2-9). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/1099-1018%28200011/12%2924%3A6%3C259%3A%3AAID-FAM745%3E3.0.CO%3B2-9>. Accessed 2022-02-21
- [232] Janíková, E., Gömöry, F.: Waveform of resistive voltage on superconducting wire at AC current overload. *Superconductor Science and Technology* **17**(12), 1395–1400 (2004). doi:[10.1088/0953-2048/17/12/006](https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/12/006). Publisher: IOP Publishing. Accessed 2022-02-21
- [233] Gkavanoudis, S.I., Demoulias, C.S.: A control strategy for enhancing the Fault Ride-Through capability of a microgrid during balanced and unbalanced grid voltage sags. *Sustainable Energy, Grids and Networks* **3**, 1–11 (2015). doi:[10.1016/j.segan.2015.05.001](https://doi.org/10.1016/j.segan.2015.05.001). Accessed 2022-02-21
- [234] Hooshyar, A., Azzouz, M.A., El-Saadany, E.F.: Distance Protection of Lines Connected to Induction Generator-Based Wind Farms During Balanced Faults. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* **5**(4), 1193–1203 (2014). doi:[10.1109/TSTE.2014.2336773](https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2336773). Conference Name: IEEE Transactions on Sustainable Energy
- [235] Villanueva, I., Rosales, A., Ponce, P., Molina, A.: Grid-Voltage-Oriented Sliding Mode Control for DFIG Under Balanced and Unbalanced Grid Faults. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* **9**(3), 1090–1098 (2018). doi:[10.1109/TSTE.2017.2769062](https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2769062). Conference Name: IEEE Transactions on Sustainable Energy
- [236] Lu, C.-W., Li, S.-C., Wu, Q.: Interconnecting ZigBee and 6LoWPAN wireless sensor networks for smart grid applications. In: 2011 Fifth International Conference on Sensing Technology, pp. 267–272 (2011). doi:[10.1109/ICSensT.2011.6136979](https://doi.org/10.1109/ICSensT.2011.6136979). ISSN: 2156-8073
- [237] Dorsch, N., Kurtz, F., Georg, H., Hägerling, C., Wietfeld, C.: Software-defined networking for Smart Grid communications: Applications, challenges and advantages. In: 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp. 422–427 (2014). doi:[10.1109/SmartGridComm.2014.7007683](https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2014.7007683)
- [238] Setiawan, M.A., Shahnia, F., Rajakaruna, S., Ghosh, A.: ZigBee-Based Communication System for Data Transfer Within Future Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid* **6**(5), 2343–2355 (2015). doi:[10.1109/TSG.2015.2402678](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2402678). Conference Name: IEEE Transactions on Smart Grid
- [239] Wang, T., Wei, X., Huang, T., Wang, J., Valencia-Cabrera, L., Fan, Z., Pérez-Jiménez, M.J.: Cascading Failures Analysis Considering Extreme Virus Propagation of Cyber-Physical Systems in Smart Grids. *Complexity* **2019**, 7428458 (2019). doi:[10.1155/2019/7428458](https://doi.org/10.1155/2019/7428458). Publisher: Hindawi. Accessed 2022-02-21
- [240] Mozina, C.J., Reichard, M., Bukhala, Z., Conrad, S., Crawley, T., Gardell, J., Hamilton, R., Hasenwinkle, I., Herbst, D., Henriksen, L., Johnson, G., Kerrigan, P., Khan, S., Kobet, G., Kumar, P., Patel, S., Nelson, B., Sevcik, D., Thompson, M., Uchiyama, J., Usman, S., Waudby, P.,

- Yalla, M.: Coordination of generator protection with generator excitation control and generator capability. In: Conference Record of 2008 54th Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp. 62–76. IEEE, Seattle, WA, USA (2008). doi:[10.1109/PAPCON.2008.4585807](https://doi.org/10.1109/PAPCON.2008.4585807). <http://ieeexplore.ieee.org/document/4585807/> Accessed 2022-02-18
- [241] Yang, F., Meliopoulos, A.P.S., Cokkinides, G.J., Dam, Q.B.: Effects of Protection System Hidden Failures on Bulk Power System Reliability. In: 2006 38th North American Power Symposium, pp. 517–523 (2006). doi:[10.1109/NAPS.2006.359621](https://doi.org/10.1109/NAPS.2006.359621)
- [242] Weng, X., Hong, Y., Xue, A., Mei, S.: Failure analysis on China power grid based on power law. *Journal of Control Theory and Applications* **4**(3), 235–238 (2006). doi:[10.1007/s11768-006-5082-7](https://doi.org/10.1007/s11768-006-5082-7). Accessed 2022-02-21
- [243] Elizondo, D.C., de La Ree, J., Phadke, A.G., Horowitz, S.: Hidden failures in protection systems and their impact on wide-area disturbances. In: 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194), vol. 2, pp. 710–7142 (2001). doi:[10.1109/PESW.2001.916941](https://doi.org/10.1109/PESW.2001.916941)
- [244] Chen, X., Sun, K., Cao, Y., Wang, S.: Identification of Vulnerable Lines in Power Grid Based on Complex Network Theory. In: 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1–6 (2007). doi:[10.1109/PES.2007.385733](https://doi.org/10.1109/PES.2007.385733). ISSN: 1932-5517
- [245] Zhai, Y., Chen, R., Yang, Q., Li, X., Zhao, Z.: Insulator Fault Detection Based on Spatial Morphological Features of Aerial Images. *IEEE Access* **6**, 35316–35326 (2018). doi:[10.1109/ACCESS.2018.2846293](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2846293). Conference Name: IEEE Access
- [246] Faza, A., Sedigh, S., McMillin, B.: Integrated Cyber-Physical Fault Injection for Reliability Analysis of the Smart Grid. In: Schoitsch, E. (ed.) *Computer Safety, Reliability, and Security. Lecture Notes in Computer Science*, pp. 277–290. Springer, Berlin, Heidelberg (2010). doi:[10.1007/978-3-642-15651-9_21](https://doi.org/10.1007/978-3-642-15651-9_21)
- [247] Huang, Z., Wang, C., Ruj, S., Stojmenovic, M., Nayak, A.: Modeling cascading failures in smart power grid using interdependent complex networks and percolation theory. In: 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp. 1023–1028 (2013). doi:[10.1109/ICIEA.2013.6566517](https://doi.org/10.1109/ICIEA.2013.6566517). ISSN: 2158-2297
- [248] Mohibullah, Laskar, S.H.: Power quality issues and need of intelligent PQ monitoring in the smart grid environment. In: 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), pp. 1–6 (2012). doi:[10.1109/UPEC.2012.6398437](https://doi.org/10.1109/UPEC.2012.6398437)
- [249] Wen, B., Moustafa, M.A., Junwu, D.: Seismic Fragilities of High-Voltage Substation Disconnect Switches. *Earthquake Spectra* **35**(4), 1559–1582 (2019). doi:[10.1193/030118EQS049M](https://doi.org/10.1193/030118EQS049M). Publisher: SAGE Publications Ltd STM. Accessed 2022-02-17
- [250] Fairley, P.: The unruly power grid. *IEEE Spectrum* **41**(8), 22–27 (2004). doi:[10.1109/MSPEC.2004.1318179](https://doi.org/10.1109/MSPEC.2004.1318179). Conference Name: IEEE Spectrum

- [251] Lim, I.H., Lim, H.T., Choi, M.S., Lee, S.J., Bak, D., Kim, T.W.: A fault section detection method using ZCT when a single phase to ground fault in ungrounded distribution system. In: IEEE PES T D 2010, pp. 1–6 (2010). doi:[10.1109/TDC.2010.5484544](https://doi.org/10.1109/TDC.2010.5484544). ISSN: 2160-8563
- [252] Pfitzner, R., Turitsyn, K., Chertkov, M.: Controlled Tripping of Overheated Lines Mitigates Power Outages. arXiv:1104.4558 [physics] (2011). arXiv: 1104.4558. Accessed 2022-02-15
- [253] Zhai, Y., Cheng, H., Chen, R., Yang, Q., Li, X.: Multi-Saliency Aggregation-Based Approach for Insulator Flashover Fault Detection Using Aerial Images. *Energies* **11**(2), 340 (2018). doi:[10.3390/en11020340](https://doi.org/10.3390/en11020340). Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Accessed 2022-02-14
- [254] Zhu, J., Lubkeman, D.L., Girgis, A.A.: Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders. *IEEE Transactions on Power Delivery* **12**(2), 801–809 (1997). doi:[10.1109/61.584379](https://doi.org/10.1109/61.584379). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery
- [255] Albinali, H.F., Meliopoulos, A.P., Vournas, C.: Dynamic state estimation-based centralized protection scheme. In: 2017 IEEE Manchester PowerTech, pp. 1–6 (2017). doi:[10.1109/PTC.2017.7981259](https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981259)
- [256] Eghtedarpour, N., Karimi, M.A., Tavakoli, M.: Harmonic resonance in power systems - a documented case. In: 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 857–861. IEEE, Bucharest, Romania (2014). doi:[10.1109/ICHQP.2014.6842806](https://doi.org/10.1109/ICHQP.2014.6842806). <http://ieeexplore.ieee.org/document/6842806/> Accessed 2022-02-17
- [257] Jin, X., Nian, H.: Overvoltage Suppression Strategy for Sending AC Grid With High Penetration of Wind Power in the LCC-HVdc System Under Commutation Failure. *IEEE Transactions on Power Electronics* **36**(9), 10265–10277 (2021). doi:[10.1109/TPEL.2021.3066641](https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3066641). Conference Name: IEEE Transactions on Power Electronics
- [258] Podporkin, G.V., Pilshikov, V.E., Sivaev, A.D.: Lightning protection of medium voltage overhead lines by modular long-flashover arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery* **18**(3), 781–787 (2003). doi:[10.1109/TPWRD.2003.813597](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.813597). Accessed 2022-02-14
- [259] Lin, X., Ke, S., Gao, Y., Wang, B., Liu, P.: A selective single-phase-to-ground fault protection for neutral un-effectively grounded systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **33**(4), 1012–1017 (2011). doi:[10.1016/j.ijepes.2011.01.017](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.01.017). Accessed 2022-02-15
- [260] Kezunovic, M.: Substation fault analysis requirements. In: 2010 Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), pp. 1–6 (2010). doi:[10.1109/ISGT.2010.5434762](https://doi.org/10.1109/ISGT.2010.5434762)
- [261] Brewis, K., Hearfield, K., Chapman, K.: Theory and practical performance of interlocked overcurrent busbar zone protection in distribution substations, 475–478 (2001). doi:[10.1049/cp:20010202](https://doi.org/10.1049/cp:20010202). Publisher: IET Digital Library. Accessed 2022-02-17
- [262] Nassu, B.T., Lippmann, L., Marchesi, B., Canestraro, A., Wagner, R., Zarnicinski, V.: Image-Based State Recognition for Disconnect Switches in Electric Power Distribution Substations. In: 2018 31st SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI), pp. 432–439 (2018). doi:[10.1109/SIBGRAPI.2018.00062](https://doi.org/10.1109/SIBGRAPI.2018.00062). ISSN: 2377-5416

- [263] Whittaker, A.S., Fenves, G.L., Gilani, A.S.J.: Seismic evaluation and analysis of high-voltage substation disconnect switches. *Engineering Structures* **29**(12), 3538–3549 (2007). doi:[10.1016/j.engstruct.2007.07.028](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.028). Accessed 2022-02-17
- [264] Yan, F., Liu, W., Tian, L.: Fault location for 10kV distribution line based on traveling wave-ANN theory. In: 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference, vol. 2, pp. 437–440 (2011). doi:[10.1109/PEAM.2011.6135094](https://doi.org/10.1109/PEAM.2011.6135094)
- [265] Alwash, S.F., Ramachandramurthy, V.K., Mithulananthan, N.: Fault-Location Scheme for Power Distribution System with Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery* **30**(3), 1187–1195 (2015). doi:[10.1109/TPWRD.2014.2372045](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2372045). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery
- [266] Salim, R.H., Salim, K.C.O., Bretas, A.S.: Further improvements on impedance-based fault location for power distribution systems. *IET Generation, Transmission & Distribution* **5**(4), 467–478 (2011). doi:[10.1049/iet-gtd.2010.0446](https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2010.0446). Publisher: IET Digital Library. Accessed 2022-02-16
- [267] McClure, G., Lapointe, M.: Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines. *Computers & Structures* **81**(8), 825–834 (2003). doi:[10.1016/S0045-7949\(02\)00472-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00472-8). Accessed 2022-02-16
- [268] Anwar, A., Mahmood, A.N., Tari, Z.: Identification of vulnerable node clusters against false data injection attack in an AMI based Smart Grid. *Information Systems* **53**, 201–212 (2015). doi:[10.1016/j.is.2014.12.001](https://doi.org/10.1016/j.is.2014.12.001). Accessed 2022-02-23
- [269] Bobbio, A., Bonanni, G., Ciancamerla, E., Clemente, R., Iacomini, A., Minichino, M., Scarlatti, A., Terruggia, R., Zendri, E.: Unavailability of critical SCADA communication links interconnecting a power grid and a Telco network. *Reliability Engineering & System Safety* **95**(12), 1345–1357 (2010). doi:[10.1016/j.ress.2010.06.011](https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.06.011). Accessed 2022-02-21
- [270] Gao, X., Thorp, J.S., Hou, D.: Case studies: Designing protection systems that minimize potential hidden failures. In: 2013 66th Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp. 384–393 (2013). doi:[10.1109/CPRE.2013.6822053](https://doi.org/10.1109/CPRE.2013.6822053)
- [271] Hsieh, T.-Y., Chen, T.-H., Yang, N.-C., Lee, W.-J.: Efficient network fault analysis method for unbalanced microgrid systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **103**, 89–101 (2018). doi:[10.1016/j.ijepes.2018.05.016](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.05.016). Accessed 2022-02-23
- [272] Xiaofeng Zhang, Soudi, F., Shirmohammadi, D., Cheng, C.S.: A distribution short circuit analysis approach using hybrid compensation method. *IEEE Transactions on Power Systems* **10**(4), 2053–2059 (1995). doi:[10.1109/59.476075](https://doi.org/10.1109/59.476075). Accessed 2022-02-14
- [273] Adu, T.: A new transmission line fault locating system. *IEEE Transactions on Power Delivery* **16**(4), 498–503 (2001). doi:[10.1109/61.956728](https://doi.org/10.1109/61.956728). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery

- [274] Xinzhou Dong, Shenxing Shi: Identifying Single-Phase-to-Ground Fault Feeder in Neutral Noneffectively Grounded Distribution System Using Wavelet Transform. *IEEE Transactions on Power Delivery* **23**(4), 1829–1837 (2008). doi:[10.1109/TPWRD.2008.917924](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917924). Accessed 2022-02-15
- [275] Zhao, Y., De Palma, J.-F., Mosesian, J., Lyons, R., Lehman, B.: Line-Line Fault Analysis and Protection Challenges in Solar Photovoltaic Arrays. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* **60**(9), 3784–3795 (2013). doi:[10.1109/TIE.2012.2205355](https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2205355). Accessed 2022-02-14
- [276] Farade, R., Kotiyal, B.: Three-phase-to-ground fault and its impact on voltage magnitude **2**(3), 8
- [277] Singh, M., Panigrahi, B.K., Maheshwari, R.P.: Transmission line fault detection and classification. In: 2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology, pp. 15–22. IEEE, Nagercoil, India (2011). doi:[10.1109/ICETECT.2011.5760084](https://doi.org/10.1109/ICETECT.2011.5760084). <http://ieeexplore.ieee.org/document/5760084/> Accessed 2022-02-15
- [278] Dutta, P., Esmaeilian, A., Kezunovic, M.: Transmission-Line Fault Analysis Using Synchronized Sampling. *IEEE Transactions on Power Delivery* **29**(2), 942–950 (2014). doi:[10.1109/TPWRD.2013.2296788](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2296788). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery
- [279] Jen-Hao Teng: Unsymmetrical Short-Circuit Fault Analysis for Weakly Meshed Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems* **25**(1), 96–105 (2010). doi:[10.1109/TPWRS.2009.2036485](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2036485). Accessed 2022-02-14
- [280] Garcia-Santander, L., Bastard, P., Petit, M., Gal, I., Lopez, E., Opazo, H.: Down-conductor fault detection and location via a voltage based method for radial distribution networks. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution* **152**(2), 180 (2005). doi:[10.1049/ip-gtd:20041300](https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20041300). Accessed 2022-02-14
- [281] Schreck, S., Prieur de La Comble, I., Thiem, S., Niessen, S.: A Methodological Framework to support Load Forecast Error Assessment in Local Energy Markets. *IEEE Transactions on Smart Grid* **11**(4), 3212–3220 (2020). doi:[10.1109/TSG.2020.2971339](https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2971339). Conference Name: IEEE Transactions on Smart Grid
- [282] Wang, C., Zhu, Y., Shi, W., Chang, V., Vijayakumar, P., Liu, B., Mao, Y., Wang, J., Fan, Y.: A Dependable Time Series Analytic Framework for Cyber-Physical Systems of IoT-based Smart Grid. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems* **3**(1), 7–1718 (2018). doi:[10.1145/3145623](https://doi.org/10.1145/3145623). Accessed 2022-02-23
- [283] Bhattarai, S., Ge, L., Yu, W.: A novel architecture against false data injection attacks in smart grid. In: 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 907–911 (2012). doi:[10.1109/ICC.2012.6364511](https://doi.org/10.1109/ICC.2012.6364511). ISSN: 1938-1883
- [284] Xu, R., Wang, R., Guan, Z., Wu, L., Wu, J., Du, X.: Achieving Efficient Detection Against False Data Injection Attacks in Smart Grid. *IEEE Access* **5**, 13787–13798 (2017). doi:[10.1109/ACCESS.2017.2728681](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2728681). Conference Name: IEEE Access

- [285] Yang, L., Li, F.: Detecting false data injection in smart grid in-network aggregation. In: 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp. 408–413 (2013). doi:[10.1109/SmartGridComm.2013.6687992](https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2013.6687992)
- [286] Frizzo Stefenon, S., Zanetti Freire, R., dos Santos Coelho, L., Meyer, L.H., Bartnik Grebogi, R., Gouvêa Buratto, W., Nied, A.: Electrical Insulator Fault Forecasting Based on a Wavelet Neuro-Fuzzy System. *Energies* **13**(2), 484 (2020). doi:[10.3390/en13020484](https://doi.org/10.3390/en13020484). Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Accessed 2022-02-17
- [287] Balla, M.S., Suryawanshi, H.M., Choudhari, B.N.: Extended Wing Technique Approach for the Detection of Winding Interturn Faults in Three-phase Transformers. *Journal of Power Electronics* **15**(1), 288–297 (2015). doi:[10.6113/JPE.2015.15.1.288](https://doi.org/10.6113/JPE.2015.15.1.288). Publisher: The Korean Institute of Power Electronics. Accessed 2022-02-17
- [288] Yousof, M.F.M., Ekanayake, C., Saha, T.K.: Frequency response analysis to investigate deformation of transformer winding. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* **22**(4), 2359–2367 (2015). doi:[10.1109/TDEI.2015.004750](https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.004750). Conference Name: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation
- [289] Aggarwal, R.K., Johns, A.T., Jayasinghe, J.A.S.B., Su, W.: An overview of the condition monitoring of overhead lines. *Electric Power Systems Research* **53**(1), 15–22 (2000). doi:[10.1016/S0378-7796\(99\)00037-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(99)00037-1). Accessed 2022-02-16
- [290] Sun, X., Lui, K.S., Wong, K.K.Y., Lee, W.K., Hou, Y., Huang, Q., Pong, P.W.T.: Novel Application of Magnetoresistive Sensors for High-Voltage Transmission-Line Monitoring. *IEEE Transactions on Magnetics* **47**(10), 2608–2611 (2011). doi:[10.1109/TMAG.2011.2158085](https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2158085). Accessed 2022-02-16
- [291] Guo, X., Liu, W., Lu, Z.: Flexible Power Regulation and Current-Limited Control of the Grid-Connected Inverter Under Unbalanced Grid Voltage Faults. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **64**(9), 7425–7432 (2017). doi:[10.1109/TIE.2017.2669018](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2669018). Conference Name: IEEE Transactions on Industrial Electronics
- [292] Dusang, L.V.: A ground fault protection method for ungrounded systems. In: 2008 IEEE Canada Electric Power Conference, pp. 1–6 (2008). doi:[10.1109/EPC.2008.4763332](https://doi.org/10.1109/EPC.2008.4763332)
- [293] Liang, D., Ge, S., Guo, H., Wang, Y., Liang, Z., Chen, C.: Monitoring Power Line Faults Using Impedance Estimation Algorithms in Power Line Communication Equipment. In: 2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), pp. 404–408. IEEE, Chengdu, China (2020). doi:[10.1109/ICPES51309.2020.9349656](https://doi.org/10.1109/ICPES51309.2020.9349656). <https://ieeexplore.ieee.org/document/9349656/> Accessed 2022-02-14
- [294] Milioudis, A.N., Andreou, G.T., Labridis, D.P.: Detection and Location of High Impedance Faults in Multiconductor Overhead Distribution Lines Using Power Line Communication Devices. *IEEE Transactions on Smart Grid* **6**(2), 894–902 (2015). doi:[10.1109/TSG.2014.2365855](https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2365855). Accessed 2022-02-14

- [295] Kruse, J., Schäfer, B., Witthaut, D.: Predictability of Power Grid Frequency. *IEEE Access* **8**, 149435–149446 (2020). doi:[10.1109/ACCESS.2020.3016477](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016477). Conference Name: IEEE Access
- [296] Luo, C., Ooi, B.-T.: Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms. *IEEE Transactions on Energy Conversion* **21**(3), 708–716 (2006). doi:[10.1109/TEC.2006.874210](https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874210). Conference Name: IEEE Transactions on Energy Conversion
- [297] Zhang, Y., Yao, W., You, S., Yu, W., Wu, L., Cui, Y., Liu, Y.: Impacts of Power Grid Frequency Deviation on Time Error of Synchronous Electric Clock and Worldwide Power System Practices on Time Error Correction. *Energies* **10**(9), 1283 (2017). doi:[10.3390/en10091283](https://doi.org/10.3390/en10091283). Number: 9 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Accessed 2022-02-21
- [298] Berbic, N., Nuhanovic, A., Madzarevic, V.: Analysis of the insulated power-grid transient behavior after faulted phase tripping. In: *Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (IEEE Cat. No.04CH37521)*, vol. 3, pp. 987–9903 (2004). doi:[10.1109/MELCON.2004.1348219](https://doi.org/10.1109/MELCON.2004.1348219)
- [299] Liu, Y., Guo, Y., Yang, Z., Hu, J., Lu, G., Wang, Y.: Power system transmission line tripping analysis using a big data platform with 3D visualization. In: *2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, pp. 1–8 (2017). doi:[10.1109/SSCI.2017.8285287](https://doi.org/10.1109/SSCI.2017.8285287)
- [300] Rahim, A.A., Abidin, I.Z.: Verification of conductor temperature and time to thermal-overload calculations by experiments. In: *2009 3rd International Conference on Energy and Environment (ICEE)*, pp. 324–329 (2009). doi:[10.1109/ICEENVIRON.2009.5398625](https://doi.org/10.1109/ICEENVIRON.2009.5398625)
- [301] Mozina, C.J.: Lessons Learned From Generator Tripping Events. *IEEE Industry Applications Magazine* **16**(5), 29–36 (2010). doi:[10.1109/MIAS.2010.937435](https://doi.org/10.1109/MIAS.2010.937435). Conference Name: IEEE Industry Applications Magazine
- [302] Karady, G.G., Gu, J.: A hybrid method for generator tripping. *IEEE Transactions on Power Systems* **17**(4), 1102–1107 (2002). doi:[10.1109/TPWRS.2002.805014](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.805014). Conference Name: IEEE Transactions on Power Systems
- [303] Song, Z., Lin, Y., Liu, C., Ma, Z., Ding, L.: Review on over-frequency generator tripping for frequency stability control. In: *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp. 2240–2243 (2016). doi:[10.1109/APPEEC.2016.7779886](https://doi.org/10.1109/APPEEC.2016.7779886)
- [304] Feng, Y., Wu, J.: Vibration Feature Analysis for Gas-Insulated Switchgear Mechanical Fault Detection under Varying Current. *Applied Sciences* **10**(3), 944 (2020). doi:[10.3390/app10030944](https://doi.org/10.3390/app10030944). Number: 3 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Accessed 2022-02-17
- [305] Klinger, C., Mehdiانpour, M., Klingbeil, D., Bettge, D., Häcker, R., Baer, W.: Failure analysis on collapsed towers of overhead electrical lines in the region Münsterland (Germany) 2005. *Engineering Failure Analysis* **18**(7), 1873–1883 (2011). doi:[10.1016/j.engfailanal.2011.07.004](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.07.004). Accessed 2022-02-16

- [306] Abdel-Salam, M., Abdallah, A., Kamel, R., Hashem, M.: Improvement of Protection Coordination for a Distribution System Connected to a Microgrid using Unidirectional Fault Current Limiter. *Ain Shams Engineering Journal* **8**(3), 405–414 (2017). doi:[10.1016/j.asej.2015.08.008](https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.08.008). Accessed 2022-02-23
- [307] Gautam, N., Ali, S., Kapoor, G.: Detection of Fault in Series Capacitor Compensated Double Circuit Transmission Line using Wavelet Transform. In: 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), pp. 760–764. IEEE, Greater Noida, Uttar Pradesh, India (2018). doi:[10.1109/GUCON.2018.8675071](https://doi.org/10.1109/GUCON.2018.8675071). <https://ieeexplore.ieee.org/document/8675071/> Accessed 2022-02-16
- [308] Mardiana, R., Motairy, H.A., Su, C.Q.: Ground Fault Location on a Transmission Line Using High-Frequency Transient Voltages. *IEEE Transactions on Power Delivery* **26**(2), 1298–1299 (2011). doi:[10.1109/TPWRD.2010.2091327](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2091327). Accessed 2022-02-15
- [309] Nagpal, M., Henville, C.: Impact of Power-Electronic Sources on Transmission Line Ground Fault Protection. *IEEE Transactions on Power Delivery* **33**(1), 62–70 (2018). doi:[10.1109/TPWRD.2017.2709279](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2709279). Accessed 2022-02-16
- [310] Wang, Y., Ziguang Zhang, Fu, Y., Yang Hei, Xiangyu Zhang: Pole-to-ground fault analysis in transmission line of DC grids based on VSC. In: 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), pp. 2028–2032. IEEE, Hefei, China (2016). doi:[10.1109/IPEMC.2016.7512607](https://doi.org/10.1109/IPEMC.2016.7512607). <http://ieeexplore.ieee.org/document/7512607/> Accessed 2022-02-16
- [311] Zeggai, A., Benhamida, F.: Power flow and Short circuit of 220 kV Substation using ETAP. In: 2019 Algerian Large Electrical Network Conference (CAGRE), pp. 1–6 (2019). doi:[10.1109/CAGRE.2019.8713172](https://doi.org/10.1109/CAGRE.2019.8713172)
- [312] Liu, P., Huang, C.: Detecting Single-Phase-to-Ground Fault Event and Identifying Faulty Feeder in Neutral Ineffectively Grounded Distribution System. *IEEE Transactions on Power Delivery* **33**(5), 2265–2273 (2018). doi:[10.1109/TPWRD.2017.2788047](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2788047). Accessed 2022-02-15
- [313] Li, X., Peng, Y., Han, G., Sun, H., Yan, B.: An Efficient Constraint Mapping-based Fault-causing Process Localization Method for Intelligent Dispatching Systems of Smart Grid: Case Study. *Journal of Internet Technology* **20**(5), 1429–1440 (2019). Number: 5. Accessed 2022-02-23
- [314] Peng, T., Zhao, S., Dan, H.-b., Yu, H.-x.: Open-circuit fault diagnosis and fault tolerance for shunt active power filter. *Journal of Central South University* **24**(11), 2582–2595 (2017). doi:[10.1007/s11771-017-3672-9](https://doi.org/10.1007/s11771-017-3672-9). Accessed 2022-02-23
- [315] Manandhar, K., Cao, X., Hu, F., Liu, Y.: Detection of Faults and Attacks Including False Data Injection Attack in Smart Grid Using Kalman Filter. *IEEE Transactions on Control of Network Systems* **1**(4), 370–379 (2014). doi:[10.1109/TCNS.2014.2357531](https://doi.org/10.1109/TCNS.2014.2357531). Accessed 2022-02-09

- [316] Rahman, H., Khan, B.H.: Power Upgrading of Transmission Line by Combining AC–DC Transmission. *IEEE Transactions on Power Systems* **22**(1), 459–466 (2007). doi:[10.1109/TPWRS.2006.887895](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.887895). Accessed 2022-02-16
- [317] Bascom, E.C., Von Dollen, D.W., Ng, H.W.: Computerized underground cable fault location expertise. In: *Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference*, pp. 376–382 (1994). doi:[10.1109/TDC.1994.328403](https://doi.org/10.1109/TDC.1994.328403)
- [318] Jones, D., Kumm, J.J.: Future Distribution Feeder Protection Using Directional Over-current Elements. *IEEE Transactions on Industry Applications* **50**(2), 1385–1390 (2014). doi:[10.1109/TIA.2013.2283237](https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2283237). Conference Name: *IEEE Transactions on Industry Applications*
- [319] Choi, S.S., Jia, X.M.: Under excitation limiter and its role in preventing excessive synchronous generator stator end-core heating. *IEEE Transactions on Power Systems* **15**(1), 95–101 (2000). doi:[10.1109/59.852106](https://doi.org/10.1109/59.852106). Conference Name: *IEEE Transactions on Power Systems*
- [320] Berube, G.R., Hajagos, L.M.: Coordination of under excitation limiters and loss of excitation relays with generator capability. In: *2009 IEEE Power Energy Society General Meeting*, pp. 1–8 (2009). doi:[10.1109/PES.2009.5275365](https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275365). ISSN: 1932-5517
- [321] Pajuolo, E., Gokaraju, R., Sachdev, M.S.: Coordination of overexcitation limiter, field over-current protection and generator control. In: *IEEE PES General Meeting*, pp. 1–7 (2010). doi:[10.1109/PES.2010.5589734](https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589734). ISSN: 1944-9925
- [322] Murdoch, A., Boukarim, G.E., Gott, B.E., D’Antonio, M.J., Lawson, R.A.: Generator over excitation capability and excitation system limiters. In: *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, vol. 1, pp. 215–2201 (2001). doi:[10.1109/PESW.2001.917037](https://doi.org/10.1109/PESW.2001.917037)
- [323] Shimomura, M., Xia, Y., Wakabayashi, M., Paserba, J.: A new advanced over excitation limiter for enhancing the voltage stability of power systems. In: *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, vol. 1, pp. 221–2271 (2001). doi:[10.1109/PESW.2001.917038](https://doi.org/10.1109/PESW.2001.917038)
- [324] Bo, Z.Q., He, J.H., Dong, X.Z., J Caunce, B.R., Klimek, A.: Overcurrent Relay based Integrated Protection Scheme for Distribution Systems. In: *2006 International Conference on Power System Technology*, pp. 1–6 (2006). doi:[10.1109/ICPST.2006.321440](https://doi.org/10.1109/ICPST.2006.321440)
- [325] Radmer, D.T., Kuntz, P.A., Christie, R.D., Venkata, S.S., Fletcher, R.H.: Predicting vegetation-related failure rates for overhead distribution feeders. *IEEE Transactions on Power Delivery* **17**(4), 1170–1175 (2002). doi:[10.1109/TPWRD.2002.804006](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.804006). Conference Name: *IEEE Transactions on Power Delivery*
- [326] Sakala, J., Daka, J.: General Fault Admittance Method Solution of a Balanced Line-to-Line-to-Line Fault. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 10 (2014)

- [327] Saha, M.M., Smetek, G., Izykowski, J., Rosolowski, E., Pierz, P.: Location of inter-circuit faults on double-circuit transmission line. In: 2015 Modern Electric Power Systems (MEPS), pp. 1–7. IEEE, Wroclaw (2015). doi:[10.1109/MEPS.2015.7477199](https://doi.org/10.1109/MEPS.2015.7477199). <http://ieeexplore.ieee.org/document/7477199/> Accessed 2022-02-16
- [328] Kim, D.-M., Kim, J.-O.: Prediction of transmission-line rating based on thermal overload probability using weather models. *European Transactions on Electrical Power* **20**(4), 534–544 (2010). doi:[10.1002/etep.337](https://doi.org/10.1002/etep.337). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/etep.337>. Accessed 2022-02-16
- [329] Li, X., Zhang, X., Wu, L., Lu, P., Zhang, S.: Transmission Line Overload Risk Assessment for Power Systems With Wind and Load-Power Generation Correlation. *IEEE Transactions on Smart Grid* **6**(3), 1233–1242 (2015). doi:[10.1109/TSG.2014.2387281](https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2387281). Accessed 2022-02-16
- [330] Jun Zhang, Jian Pu, McCalley, J.D., Stern, H., Gallus, W.A.: A Bayesian approach for short-term transmission line thermal overload risk assessment. *IEEE Transactions on Power Delivery* **17**(3), 770–778 (2002). doi:[10.1109/TPWRD.2002.1022802](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.1022802). Accessed 2022-02-16
- [331] Demirok, E., González, P.C., Frederiksen, K.H.B., Sera, D., Rodriguez, P., Teodorescu, R.: Local Reactive Power Control Methods for Overvoltage Prevention of Distributed Solar Inverters in Low-Voltage Grids. *IEEE Journal of Photovoltaics* **1**(2), 174–182 (2011). doi:[10.1109/JPHOTOV.2011.2174821](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2011.2174821). Conference Name: IEEE Journal of Photovoltaics
- [332] Tonkoski, R., Lopes, L.A.C., El-Fouly, T.H.M.: Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* **2**(2), 139–147 (2011). doi:[10.1109/TSTE.2010.2098483](https://doi.org/10.1109/TSTE.2010.2098483). Conference Name: IEEE Transactions on Sustainable Energy
- [333] Chu, R.F.: On selecting transmission lines for dynamic thermal line rating system implementation. *IEEE Transactions on Power Systems* **7**(2), 612–619 (1992). doi:[10.1109/59.141766](https://doi.org/10.1109/59.141766). Conference Name: IEEE Transactions on Power Systems
- [334] Sachdev, M.S.: Determining locations of faults in distribution systems. In: 6th International Conference on Developments in Power Systems Protection, vol. 1997, pp. 188–191. IEE, Nottingham, UK (1997). doi:[10.1049/cp:19970060](https://doi.org/10.1049/cp:19970060). <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp19970060> Accessed 2022 – 02 – 15
- [335] Jia, J., Yang, G., Nielsen, A.H.: A Review on Grid-Connected Converter Control for Short-Circuit Power Provision Under Grid Unbalanced Faults. *IEEE Transactions on Power Delivery* **33**(2), 649–661 (2018). doi:[10.1109/TPWRD.2017.2682164](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2682164). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery
- [336] Ozcivit, C., Karatekin, C.: Designing of a compact mobile substation and short-circuit analysis in a real distribution system. *International Transactions on Electrical Energy Systems* **31**(8), 12903 (2021). doi:[10.1002/2050-7038.12903](https://doi.org/10.1002/2050-7038.12903). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2050-7038.12903>. Accessed 2022-02-17

- [337] Choi, M.-S., Lee, S.-J., Lim, S.-I., Lee, D.-S., Yang, X.: A Direct Three-Phase Circuit Analysis-Based Fault Location for Line-to-Line Fault. *IEEE Transactions on Power Delivery* **22**(4), 2541–2547 (2007). doi:[10.1109/TPWRD.2007.905535](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905535). Accessed 2022-02-15
- [338] Tarafdar Hagh, M., Razi, K., Taghizadeh, H.: Fault classification and location of power transmission lines using artificial neural network. In: 2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007), pp. 1109–1114 (2007). ISSN: 1947-1270
- [339] Singh, M., Panigrahi, B.K., Maheshwari, R.P.: Transmission line fault detection and classification. In: 2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology, pp. 15–22 (2011). doi:[10.1109/ICETECT.2011.5760084](https://doi.org/10.1109/ICETECT.2011.5760084)
- [340] Bollen, M.H.J.: Voltage recovery after unbalanced and balanced voltage dips in three-phase systems. *IEEE Transactions on Power Delivery* **18**(4), 1376–1381 (2003). doi:[10.1109/TPWRD.2003.817725](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.817725). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery
- [341] Zhang, S., Liu, B., Zheng, S., Ma, Y., Wang, F., Tolbert, L.M.: Development of a Converter-Based Transmission Line Emulator With Three-Phase Short-Circuit Fault Emulation Capability. *IEEE Transactions on Power Electronics* **33**(12), 10215–10228 (2018). doi:[10.1109/TPEL.2018.2805835](https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2805835). Accessed 2022-02-14
- [342] Asif, R.M., Hassan, S.R., Rehman, A.U., Rehman, A.U., Masood, B., Sher, Z.A.: Smart Underground Wireless Cable Fault Detection and Monitoring System. In: 2020 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), pp. 1–5 (2020). doi:[10.1109/ICEET48479.2020.9048210](https://doi.org/10.1109/ICEET48479.2020.9048210). ISSN: 2409-2983
- [343] Pandey, A., Younan, N.H.: Underground cable fault detection and identification via fourier analysis. In: 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, pp. 618–621 (2010). doi:[10.1109/ICHVE.2010.5640779](https://doi.org/10.1109/ICHVE.2010.5640779)
- [344] Sharma, S., Srivastava, L.: Prediction of transmission line overloading using intelligent technique. *Applied Soft Computing* **8**(1), 626–633 (2008). doi:[10.1016/j.asoc.2007.05.001](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.05.001)
- [345] Manousakis, N.M., Korres, G.N.: A hybrid power system state estimator using synchronized and unsynchronized sensors. *International Transactions on Electrical Energy Systems* **28**(8), 2580 (2018). doi:[10.1002/etep.2580](https://doi.org/10.1002/etep.2580). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/etep.2580>. Accessed 2022-02-23
- [346] Dobakhshari, A.S., Abdolmaleki, M., Terzija, V., Azizi, S.: Online Non-Iterative Estimation of Transmission Line and Transformer Parameters by SCADA Data. *IEEE Transactions on Power Systems* **36**(3), 2632–2641 (2021). doi:[10.1109/TPWRS.2020.3037997](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3037997). Conference Name: IEEE Transactions on Power Systems
- [347] Dobakhshari, A.S., Azizi, S., Paolone, M., Terzija, V.: Ultra Fast Linear State Estimation Utilizing SCADA Measurements. *IEEE Transactions on Power Systems* **34**(4), 2622–2631 (2019). doi:[10.1109/TPWRS.2019.2894518](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2894518). Conference Name: IEEE Transactions on Power Systems

- [348] Tsikalakis, A.G., Hatziargyriou, N.D.: Operation of microgrids with demand side bidding and continuity of supply for critical loads. *European Transactions on Electrical Power* **21**(2), 1238–1254 (2011). doi:[10.1002/etep.441](https://doi.org/10.1002/etep.441). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/etep.441>. Accessed 2022-02-23
- [349] Harness, R.E., Walters, E.L.: Woodpeckers and utility pole damage. *IEEE Industry Applications Magazine* **11**(2), 68–73 (2005). doi:[10.1109/MIA.2005.1405829](https://doi.org/10.1109/MIA.2005.1405829). Conference Name: IEEE Industry Applications Magazine
- [350] El Najjar, J., Mustapha, S.: Condition assessment of timber utility poles using ultrasonic guided waves. *Construction and Building Materials* **272**, 121902 (2021). doi:[10.1016/j.conbuildmat.2020.121902](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121902). Accessed 2022-02-16
- [351] Williams, J.H., Paulik, R., Wilson, T.M., Wotherspoon, L., Rusdin, A., Pratama, G.M.: Tsunami Fragility Functions for Road and Utility Pole Assets Using Field Survey and Remotely Sensed Data from the 2018 Sulawesi Tsunami, Palu, Indonesia. *Pure and Applied Geophysics* **177**(8), 3545–3562 (2020). doi:[10.1007/s00024-020-02545-6](https://doi.org/10.1007/s00024-020-02545-6). Accessed 2022-02-16
- [352] Protopapas, C.A., Psaltiras, K.P., Machias, A.V.: An expert system for substation fault diagnosis and alarm processing. *IEEE Transactions on Power Delivery* **6**(2), 648–655 (1991). doi:[10.1109/61.131123](https://doi.org/10.1109/61.131123). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery
- [353] Guo, X., Liu, W., Zhang, X., Sun, X., Lu, Z., Guerrero, J.M.: Flexible Control Strategy for Grid-Connected Inverter Under Unbalanced Grid Faults Without PLL. *IEEE Transactions on Power Electronics* **30**(4), 1773–1778 (2015). doi:[10.1109/TPEL.2014.2344098](https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2344098). Conference Name: IEEE Transactions on Power Electronics
- [354] Zhang, J., Li, T.-y., Hu, X.: The Design of Intelligentized Switch Cabinet Based on the Internet of Things. *DEStech Transactions on Materials Science and Engineering* **0**(msce) (2016). doi:[10.12783/dtmse/msce2016/10450](https://doi.org/10.12783/dtmse/msce2016/10450). Number: msce. Accessed 2022-02-17

Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Außerdem versichere ich, dass ich die allgemeinen Prinzipien wissenschaftlicher Arbeit und Veröffentlichung, wie sie in den Leitlinien guter wissenschaftlicher Praxis der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg festgelegt sind, befolgt habe.

Unterschrift



Oldenburg, den 24. April 2022

Malte Südema