

Institut für Elektrotechnik

Masterarbeit

„Algorithmus zur Bewertung von Schutzsystemen
im Übertragungsnetz“

am 30.12.2019 vorgelegte Masterarbeit
von Toni Kahl

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. P. Komarnicki

Zweitprüfer: Dr.-Ing. M. Richter

Betreuer: Dr.-Ing. Marc Richter

Aufgabenstellung im Original

Vor dem Hintergrund der Digitalisierung und der Abbildung realer Systeme durch Digitale Zwillinge, sollen Eigenschaften von Stromnetzen in Algorithmen gefasst werden. Ziel der Master-Thesis soll es daher sein, die Ausstattung des Übertragungsnetzes mit Schutzgeräten zu bewerten. Es soll dabei auf Netzstrukturen und Schutzgeräte eingegangen und ein Bewertungssystem entwickelt werden.

Für die Bewertung der Schutzsysteme müssen Kriterien ausgewählt und innerhalb der programmtechnischen Umsetzung Anwendung finden. Die Eingabe der Netzwerke und deren Eigenschaften sowie die Überprüfung des Algorithmus anhand selbst gewählter Beispiele sind Bestandteil der Aufgabenstellung.

Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

30. Dezember 2019

.....

Datum

Unterschrift

I Abstract

Despite a partial shift of energy generation to lower network levels, the transmission network is essential for the power supply in Germany and Europe. Supply problems and malfunctions therefore have far-reaching consequences for the entire power grid. Accordingly, it is important to monitor the existing protection systems and to optimize them continuously.

This master's thesis deals with the evaluation of protection systems in the transmission network and develops variants for program evaluation. Different program versions are presented and tested with reference to sample networks. Problems in particular are explained and possible solutions are shown.

II Kurzreferat

Trotz einer teilweisen Verlagerung der Energieerzeugung in untere Netzebenen, ist das Übertragungsnetz unerlässlich für die Stromversorgung Deutschlands und Europas. Versorgungsschwierigkeiten und Störungsfälle haben daher weitreichende Folgen für das gesamte Stromnetz. Es ist dementsprechend wichtig die vorhandenen Schutzsysteme zu überwachen und stetig zu optimieren.

Die vorliegende Master-Thesis behandelt die Bewertung von Schutzsystemen im Übertragungsnetz und entwickelt Varianten zur programmtechnischen Auswertung. Es werden verschiedene Programmversionen vorgestellt und diese in Bezug auf Beispielnetze getestet. Insbesondere auftretende Problemstellungen werden erläutert und mögliche Lösungen aufgezeigt.

III Inhaltsverzeichnis

I	Abstract	I
II	Kurzreferat	II
III	Inhaltsverzeichnis	III
IV	Abbildungsverzeichnis	V
V	Tabellenverzeichnis	VI
VI	Symbolverzeichnis	VII
VII	Formelverzeichnis	IX
VIII	Abkürzungsverzeichnis.....	X
1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufbau des Stromnetzes	1
1.3	Bedeutung des Übertragungsnetzes.....	2
1.4	Aufbau der Arbeit.....	3
2	Grundlagen der Schutztechnik	4
2.1	Begriffsklärung.....	4
2.2	Schutzgeräte	5
2.2.1	Maximalstrom Zeitschutz.....	5
2.2.2	Differentialschutz	6
2.2.3	Distanzschutz.....	7
2.3	Betrachtete Schutzsysteme	7
3	Mathematische Modellierung elektrischer Netzwerke	9
3.1	Adjazenzmatrix	10
3.2	Inzidenzmatrix.....	11
3.3	Knoten-Terminal-Matrix	12
3.4	Vergleich der Varianten	13
4	Bewertungssystem	15
4.1	Bewertung von Schutzsystemen.....	16
4.2	Bewertungssystem anhand eines Beispiels	17
5	Umsetzung in Matlab	19
5.1	Anforderungsdefinition	19
5.2	Eingangsdaten	19
5.2.1	Netzstruktur	20
5.2.2	Schutzsystem.....	20
5.2.3	Auslösezeiten.....	22

5.3	Ausgangsdaten.....	22
5.4	Umsetzung.....	23
5.4.1	Erste Programmversion	23
5.4.2	Zweite Programmversion	28
5.4.3	Dritte Programmversion	37
5.4.4	Problemstellung IEEE-Testnetz	42
5.4.5	Vierte Programmversion	43
6	Zusammenfassung und Ausblick	47
7	Literaturverzeichnis	49
A	Bewertung Version 1	51
B	Bewertung Version 2	54
C	Bewertung Version 2: Funktion Hauptschutz	57
D	Bewertung Version 2: Funktion Reserveschutz	58
E	Bewertung Version 3	60
F	Programmablaufplan: Bewertung Version 3.....	63
G	Bewertung Version 4	70
H	Input-5-Stationen.....	72
I	Input-6-Stationen.....	73
J	WSCC 9-Knoten-Testnetz	74
K	WSCC 9-Knoten-Testnetz nach [22]	75

IV Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Zweistufige UMZ-Kennlinie nach [6]	5
Abbildung 2.2	AMZ-Kennlinien nach [6].....	6
Abbildung 2.3	Impedanz/Zeit-Kennlinie des Distanzschutzes nach [6]	7
Abbildung 3.1	5-Knoten-Beispielnetz.....	9
Abbildung 3.2	5-Knoten-Beispielnetz mit vollständiger Darstellung der Kanten	10
Abbildung 3.3	5-Knoten-Beispielnetz mit Terminals	13
Abbildung 4.1	Energieeffizienzklassen von Haushaltsgeräten nach [11]	15
Abbildung 4.2	3-Knoten-Beispielnetz.....	18
Abbildung 5.1	3-Knoten-Beispielnetz.....	20
Abbildung 5.2	Netzstruktur-Matrix A des 3-Knoten-Beispielnetzes	20
Abbildung 5.3	Schutz-Matrix X mit Hauptschutz	21
Abbildung 5.4	Schutz-Matrix X mit Reserveschutz.....	21
Abbildung 5.5	Auslösezeiten für Hauptschutz T_1 und Reserveschutz T_2	22
Abbildung 5.6	Berechnung und Ausgabe der Hauptschutz-Bewertung	23
Abbildung 5.7	Hauptschutz der ersten Programmversion	24
Abbildung 5.8	Reserveschutz der ersten Programmversion	25
Abbildung 5.9	Auslösezeiten der ersten Programmversion	26
Abbildung 5.10	Netzstruktur Input-5-Stationen.....	26
Abbildung 5.11	Input-5-Stationen mit Mehrfachabsicherung	27
Abbildung 5.12	Funktionsaufruf in Matlab nach [18]	28
Abbildung 5.13	Input-6-Stationen.....	29
Abbildung 5.14	Anzahl der Kanten.....	30
Abbildung 5.15	Reserveschutz an unverzweigtem Knoten	30
Abbildung 5.16	Spaltenvektoren x_3 und a für Knoten 2	31
Abbildung 5.17	Reserveschutz an verzweigtem Knoten	32
Abbildung 5.18	Funktionsprinzip des Reserveschutzes bei Verzweigungen	32
Abbildung 5.19	Eingabedaten Input-6-Stationen.....	34
Abbildung 5.20	Problemstellung Input-6-Stationen	35
Abbildung 5.21	Problemstellung verzweigter Knoten	36
Abbildung 5.22	WSCC 9-Knoten-Testnetz nach [22]	37
Abbildung 5.23	direkte Absicherung einer Kante	38
Abbildung 5.24	indirekte, einfache Absicherung einer Kante	40
Abbildung 5.25	WSCC 9-Knoten-Testnetz mit Erweiterung	42
Abbildung 5.26	WSCC 9-Knoten-Testnetz mit Erweiterung und Terminals	44
Abbildung 5.27	Hauptschutz der vierten Programmversion	45

V Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1	Bezeichnung der Netzebenen nach [1] und [2]	2
Tabelle 3.1	Vergleich der Modellierungsmethoden	14
Tabelle 4.1	Bewertungssystem mit Angabe der Prozentsätze	17
Tabelle 4.2	Schutzgeräte-Ausstattung des Beispielnetzes	18
Tabelle 5.1	Bewertungsbeispiel Input-5-Stationen	27
Tabelle 5.2	Bewertungsbeispiel Input-6-Stationen	34

VI Symbolverzeichnis

ans	Antwort-Variable (answer)
b	Anzahl der Kanten mit Hauptschutz
b_1	Anzahl der Kanten mit Reserveschutz
b_2	Hilfsvariable: Anzahl der Kanten mit Reserveschutz
b_3	Hilfsvariable: Anzahl der Kanten mit Reserveschutz
b_4	Hilfsvariable: Anzahl der Kanten mit Reserveschutz
n_K	Anzahl der Knoten
n_L	Anzahl der Kanten
n_T	Anzahl der Terminals
R	Ergebnis der Bewertung (Result)
t	Anzahl der Kanten mit Auslösezeit Hauptschutz
t_1	Anzahl der Kanten mit Auslösezeit Reserveschutz
x_2	Anzahl der Kanten aus x_1
x_{31}	Anzahl der Kanten aus x_3
x_4	Anzahl der Kanten aus x_1

Matrizen und Vektoren

A	Adjazenzmatrix/ Netzstruktur-Matrix
A_{11}	Hilfsmatrix aus mit Spalten aus A
a	Spaltenvektor aus A
a_1	Spaltenvektor mit Zeilen aus a
ans	Antwort-Variable als Vektor bzw. Matrix
B	Knoten-Termin _a l-Matrix
I	Inzidenzmatrix
S	Spalten aus A_{11}
T_1	Auslösezeiten-Matrix Hauptschutz
T_2	Auslösezeiten-Matrix Reserveschutz
X	Schutz-Matrix
X_1	Schutz-Matrix ohne Hauptschutz
x_1	Spaltenvektor aus X_1
X_2	obere Dreiecksmatrix von X_1
x_2	Spaltenvektor aus X_2
X_3	untere Dreiecksmatrix von X_1
x_3	Spaltenvektor aus X_3
z	Zeilen aus A_{11}

Indizes

H	Hauptschutz
i	Zeile einer Matrix
j	Spalte einer Matrix
R	Reserveschutz

VII Formelverzeichnis

Formel (2.1)	Kirchhoff'sches Gesetz	6
Formel (3.1)	Bildung der Adjazenzmatrix	10
Formel (3.2)	gerichtete Adjazenzmatrix mit Kantengewichten	11
Formel (3.3)	Definition Inzidenzmatrix	11
Formel (3.4)	Bildung der ungerichteten Inzidenzmatrix	11
Formel (3.5)	Bildung der gerichteten Inzidenzmatrix	11
Formel (3.6)	gerichtete Inzidenzmatrix.....	12
Formel (3.7)	Definition Knoten-Terminal-Matrix	12
Formel (3.8)	Bildung der Knoten-Terminal-Matrix	12
Formel (3.9)	Knoten-Terminal-Matrix.....	13
Formel (4.1)	Bewertung des Hauptschutzes	17
Formel (5.1)	Schutz-Matrix X für das 3-Knoten-Beispielnetz	21
Formel (5.2)	obere Dreiecksmatrix X_2	36
Formel (5.3)	untere Dreiecksmatrix X_3	36
Formel (5.4)	Schutz-Matrix X_1 mit Absicherung der Kante 4 nach 6.....	39
Formel (5.5)	Schutz-Matrix X der Beispielbewertung	41
Formel (5.6)	Schutz-Matrix X des WSCC 9-Knoten-Testnetzes	43
Formel (5.7)	Netzstruktur-Matrix A des WSCC 9-Knoten-Testnetzes.....	43
Formel (5.8)	Schutz-Matrix X mit Verbindungen zwischen den Terminals	45

VIII Abkürzungsverzeichnis

AMZ	Abhängiger Maximalstrom Zeitschutz
StromNEV	Stromnetzentgeltverordnung
UMZ	Unabhängiger Maximalstrom Zeitschutz
WSCC	Western System Coordinating Council

1 Einleitung

1.1 Motivation

Im Zuge der Digitalisierung sollen technische Systeme virtuell abgebildet und das Verhalten möglichst genau nachgestellt werden. Eine solche virtuelle Nachbildung oder auch Digitaler Zwilling kann genutzt werden, um unter anderem Systeme zu steuern, zu verändern oder auch zu optimieren. Der Digitale Zwilling bietet dabei den Vorteil, dass beispielsweise Betriebssituationen simuliert werden können, ohne das reale System zu gefährden. In Bezug auf das Stromnetz bietet diese Eigenschaft verschiedene Möglichkeiten der Optimierung des Netzes bzw. der Netzstruktur und der Betriebsführung.

Für die Erstellung eines Digitalen Zwillings ist es notwendig sämtliche Eigenschaften des technischen bzw. realen Systems, hier des Übertragungsnetzes, zu kennen und digital nachzubilden. Die Nachbildung beschränkt sich nicht auf die Struktur des Netzes und die Ausstattung mit Betriebsmitteln, sondern auch deren Verhalten und zu Grunde liegende Gesetzmäßigkeiten. Oft bestehen Digitale Zwillinge wie auch reale Systeme aus verschiedenen Subsystemen. Ein solches Subsystem besteht im Netzschutz, welcher durch verschiedenste Eigenschaften beschrieben wird. Es ist dementsprechend die grundlegende Motivation dieser Arbeit, einen Teil der Gesetzmäßigkeiten des Netzschutzes speziell für das Übertragungsnetz nachzubilden.

1.2 Aufbau des Stromnetzes

Der klassische Aufbau des Stromnetzes beruht auf der vertikalen Übertragung und Verteilung der Energie vom Erzeuger hin zum Verbraucher. Die Energie wird dabei von Kraftwerken erzeugt und gelangt über die verschiedenen Netzebenen zum Verbraucher. Die Netzebenen werden nachfolgend benannt und kurz erläutert. Dezentrale Erzeugungsanlagen, welche heutzutage bis in die unterste Netzebene reichen, werden für die nachfolgende Betrachtung vernachlässigt.

Für die Netzebenen existieren unterschiedliche Bezeichnungen, die sich an der verwendeten Spannungsebene oder Funktion orientieren, siehe Tabelle 1.1. Bei der Einteilung nach Spannungsebenen wird eine scharfe Abgrenzung zu einem durch das Vorhandensein verschiedener Zwischenstufen, wie beispielsweise Netze mit einer Betriebsspannung von 60kV, und zum anderen durch die je nach Kontext

unterschiedliche Verwendung des Begriffes der Hochspannung, teilweise als generelle Bezeichnung für alle Spannungsebenen oberhalb der Niederspannung, erschwert.

Tabelle 1.1 Bezeichnung der Netzebenen nach [1] und [2]

Bezeichnung nach		
Spannungsebene	Funktion	Nennspannung
Höchstspannung	Übertragungs-bzw. Transportnetz	380/220kV
Hochspannung	Überregionales Verteilnetz	110kV
Mittelspannung	Regionales Verteilnetz	10 bis 30kV
Niederspannung	Verteilnetz	400/230V

Die Bezeichnung nach der Funktion der jeweiligen Netzebene erscheint daher sinnvoller und wird in den folgenden Betrachtungen herangezogen. Zudem wird diese Einteilung vermehrt in der Fachliteratur verwendet, wobei auch hier erwähnt werden muss, dass eine Unterscheidung der Ebenen nicht immer eindeutig vollzogen werden kann. Es werden daher teilweise die jeweiligen Nennspannungen ergänzend herangezogen.

Eine weitere Einteilung wird durch die Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) vorgenommen. Es werden hierbei insgesamt 7 verschiedene Netzebenen verwendet [2]. Neben der bereits erwähnten Gliederung werden zusätzlich die Stufen der Transformierung zwischen den Ebenen als eigenständige Netzebene angesehen. Die Erwähnung der Einteilung nach StromNEV erfolgt der Vollständigkeit halber und wird für spätere Betrachtungen nicht herangezogen.

Grundlegend kann, wie schon erwähnt, die Energieverteilung als vertikal ablaufender Prozess angesehen werden. Der Einsatz verschiedener Netzebenen dient dabei der Übertragung angepasst an die Übertragungsstrecke und der Speisung bzw. Einspeisung verschieden großer Lasten und Kraftwerke. Dementsprechend werden durch das Übertragungsnetz die größten Distanzen überwunden und es erfolgt die Einspeisung von Großkraftwerken, während im Verteilnetz bei Einsatz von Niederspannung kurze Strecken zurückgelegt und kleine Verbraucher versorgt werden. Es erfolgt somit ein Energiefluss von der höheren zur niedrigeren Netzebene.

1.3 Bedeutung des Übertragungsnetzes

Charakteristisch für das Übertragungs- bzw. Transportnetz ist die Einspeisung von Kraftwerken mit Leistungen bis in den Gigawatt-Bereich, während grundlegend keine direkten Verbraucher vorhanden sind. Die eingespeiste Energie wird über weite Strecken

transportiert und zur Versorgung der unteren Netzebenen verwendet, weshalb der Einsatz von Höchstspannung notwendig wird.

Das Übertragungsnetz fungiert zudem als Bindeglied zwischen den verschiedenen Staaten, welche zusammen das kontinentaleuropäische Verbundnetz (ehemals UCTE) betreiben. Somit stellt das Übertragungsnetz die physikalische Ebene für den europäischen Stromhandel als Medium für den Austausch von elektrischer Energie dar. Daraus ergibt sich eine signifikante Bedeutung für die Netzstabilität und die Versorgungssicherheit im gesamten Verbundnetz. Ein Ausfall des Übertragungsnetzes hätte somit verheerende Auswirkungen auf sämtliche Ebenen des gesamten Stromnetzes bis hin zum Gesamtausfall.

Ein Beispiel hierfür ist der Stromausfall vom 04. November 2006 durch dessen Verlauf das kontinentaleuropäische Verbundnetzes in drei Frequenzgebiete aufgesplittet wurde. Grund des Ausfalls war die geplante Abschaltung einer 380kV-Freileitung über die Ems, welche durch die Verknüpfung verschiedener Komplikationen zu einem großflächigen Engpass führte. Betroffen waren mehr als 15 Millionen Haushalte [3;4].

Anhand des Beispiels wird deutlich, dass Störungen des Übertragungsnetzes weitreichende Auswirkungen auf das gesamte Stromnetz haben und dessen Absicherung daher von großer Bedeutung ist.

1.4 Aufbau der Arbeit

In der vorliegenden Master-Thesis werden nach der Einleitung in Kapitel 2 zunächst grundlegende Begriffe der Schutztechnik erläutert und die wichtigsten Arten von Schutzgeräten vorgestellt. Es werden zudem die betrachteten Schutzsysteme charakterisiert.

Anschließend werden verschiedene Varianten der Mathematischen Modellierung von elektrischen Netzwerken in Kapitel 3 aufgezeigt und miteinander verglichen. Im Anschluss wird die Bewertung von Schutzsystemen innerhalb des Kapitels 4 thematisiert und hierbei eine Möglichkeit der Bewertung vorgestellt. In Kapitel 5 wird die programmtechnische Umsetzung in Matlab dargestellt. Es werden mehrere Programmversionen erstellt und diese in Bezug auf Problemstellungen analysiert.

Zusammenfassung und Ausblick in Kapitel 6 vollenden die Arbeit.

2 Grundlagen der Schutztechnik

Zum Verständnis der nachfolgenden Programme werden zunächst einige grundlegende Begrifflichkeiten zum Thema Schutzsysteme erläutert bzw. wird der zu Grunde liegende Aufbau von Schutzsystemen im Höchstspannungsnetz geklärt. Die beschriebenen Sachverhalte zum Thema Schutztechnik bilden dabei jeweils nur einen Auszug.

2.1 Begriffsklärung

Der Begriff des **Hauptschutz** steht in Zusammenhang mit der Selektivität. Der Hauptschutz soll bei Eintritt eines Fehlers in Schnellzeit auslösen und das Betriebsmittel in erster Instanz schützen, um so Schäden zu vermeiden [3].

Der **Reserveschutz** bewirkt eine Auslösung im Fehlerfall bei Nicht-Auslösung bzw. Versagen des Hauptschutzes. Die Auslösung erfolgt verzögert durch vorgelagerte Schutzeinrichtungen [3].

Selektivität bezeichnet die Eigenschaft eines Schutzsystems bei Auftreten eines Fehlers lediglich das betroffene Betriebsmittel vom übrigen Netz abzutrennen. Besonders in Stromnetzen soll möglichst selektiv ausgelöst werden, um den weiteren Betrieb und damit die Stromversorgung aufrechtzuerhalten [4].

Unter **Staffelung** versteht man in der Schutztechnik zumeist eine Unterteilung des Systems z.B. der zu schützenden Leitung in Abschnitte, welche für eine selektive Auslösung sorgen. Staffelung erfolgt durch Abstufung der Auslösezeiten, der nacheinander angeordneten Schutzgeräte bzw. in Abhängigkeit von der Impedanz, auch Kriterien wie die Richtung des Fehlers spielen eine Rolle [4].

Die **Auslösezeit** eines Schutzgeräts gibt die Dauer von der Detektion eines Fehlers bis zum Ausgeben des Abschaltbefehls an [3].

2.2 Schutzgeräte

Im folgenden Abschnitt wird auf die wichtigsten Arten von Schutzgeräten besonders in Bezug auf das Übertragungsnetz eingegangen. Schutzgeräte wie beispielsweise die Schmelzsicherung, welche auch in Spannungsebenen bis zur Mittelspannung im Einsatz sind, werden nicht betrachtet.

Die Unterscheidung der Schutzgeräte erfolgt nach der Art der Auslösung bzw. der Art der Fehlererkennung. An Schutzgeräten kann zudem die Anregung unterschieden werden, diese kann ebenfalls durch einen voreingestellten Strom- oder Impedanzwert erfolgen, muss aber nicht mit der Auslösung übereinstimmen. So kann ein Distanzschutzrelais durch eine Überstrom-Anregung aktiviert werden [5].

Zudem muss beachtet werden, dass auch die Art des Schutzobjektes variieren kann. Die verschiedenen Arten der Auslösung kommen zum Schutz von Transformatoren, Leitungen und Sammelschienen zum Einsatz. Die Ausführung der Schutzgeräte ist dabei an das jeweilige Schutzobjekt angepasst, während das Grundprinzip der Auslösung gleichbleibt [5].

2.2.1 Maximalstrom Zeitschutz

Der Vorteil des Maximalstrom Zeitschutzes allgemein besteht in dem einfachen Aufbau des Gerätes bzw. des Schutzsystems, da lediglich ein Stromwandler benötigt wird. Das Kriterium für die Erkennung von Fehlern besteht dementsprechend in dem Überschreiten eines eingestellten Stromes. Selektivität wird durch Zeitstaffelung erreicht.

Unterschieden werden zwei Arten von Auslösecharakteristiken. Zum einen der Unabhängige Maximalstrom Zeitschutz (UMZ), Abbildung 2.1, welcher unabhängig von der Höhe des Fehlerstromes nach eingestellter Zeit auslöst.

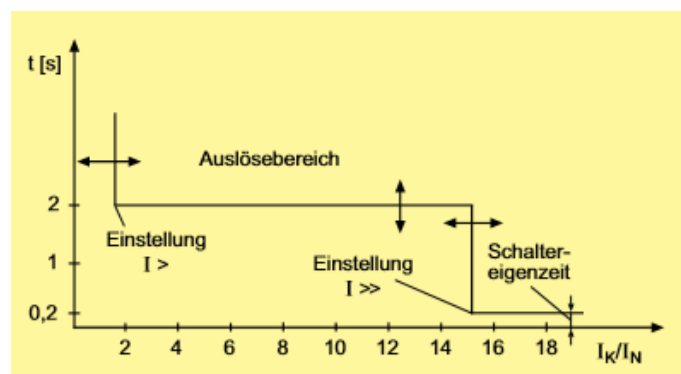


Abbildung 2.1 Zweistufige UMZ-Kennlinie nach [6]

Dem gegenüber steht der Abhängige Maximalstrom Zeitschutz (AMZ), Abbildung 2.2. Diese Variante des Maximalstrom Zeitschutzes erlaubt es auf verschiedene Fehlerströme unterschiedlich schnell zu reagieren, wodurch die Belastung für die zu schützenden Objekte im Fehlerfall abnimmt.

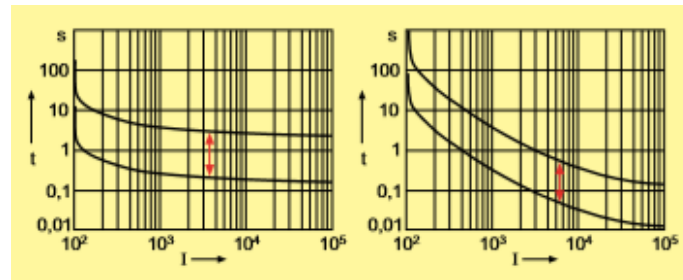


Abbildung 2.2 AMZ-Kennlinien nach [6]

Der Maximalstrom Zeitschutz kann als gerichtete Variante auch für doppelt gespeiste Leitungen Verwendung finden [6].

2.2.2 Differentialschutz

Der Differentialschutz basiert auf dem 1. Kirchhoffschen Gesetz, wonach die Summe aller hinein- und herausfließender Ströme an einem Knotenpunkt gleich Null ist, Formel (2.1). Es wird der Strom vor und nach dem Schutzobjekt gemessen und verglichen, meist durch bilden eines Differenzstromes. Bei Abweichung der Ströme liegt ein Fehler im Schutzobjekt vor [5].

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (2.1)$$

Insbesondere für den Schutz großer Objekte ist ein direkter Vergleich der Ströme nicht möglich. Es kommt daher der sog. Leitungsvergleichsschutz zum Einsatz, wobei die Differentialschutzrelais am Anfang und Ende des Schutzobjektes über Nachrichtenkanäle kommunizieren [6].

Der Differentialschutz wird für Transformatoren, Leitungen und Sammelschienen verwendet [3].

2.2.3 Distanzschutz

Die Bezeichnung Distanzschutz leitet sich grundlegend aus dem Funktionsprinzip ab. Als Auslösekriterium fungiert die Impedanz des zu schützenden Objektes, welche indirekt aus Strom und Spannung bestimmt wird. Durch Kenntnis der Impedanz, beispielsweise einer Leitung, kann zudem ein Zusammenhang zur Länge hergestellt werden, wodurch die Einteilung verschiedener Staffelnzonen möglich wird, siehe Abbildung 2.3.

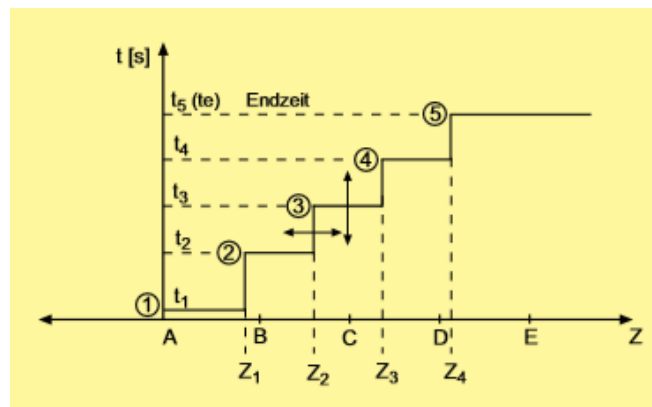


Abbildung 2.3 Impedanz/Zeit-Kennlinie des Distanzschutzes nach [6]

Aufgrund der Messung von Strom und Spannung ist es möglich sowohl verschiedene Formen der Anregung als auch der Fehlererkennung zu realisieren und den Schutz vermaschter Netze zu gewährleisten. Allerdings ist die Messung als solche aufwendiger und benötigt möglichst genaue Kenntnis der vorherrschenden Verhältnisse im Netz bzw. ist aufwendiger in der Konfiguration [6].

2.3 Betrachtete Schutzsysteme

Die Betrachtung der Schutzsysteme erfolgt für die Ebene des Übertragungs- bzw. Transportnetzes. Nachfolgende Netzebenen und die zugehörigen Verknüpfungspunkte werden dementsprechend nicht betrachtet. Gleiches gilt für die Anbindung von Kraftwerken bzw. Generatoren am Netz, welche durch zusätzliche Schutzmaßnahmen abgesichert werden.

Es wird die Absicherung der Netzebene in Bezug auf den Schutz der Freileitungen bzw. Kabel gegen Überstrom betrachtet. Aufgrund der stark vermaschten Struktur des Übertragungsnetzes werden zumeist die Schutzprinzipien des Differential- und

Distanzschutzes verwendet, da der Überstromzeitschutz lediglich für einfache Strukturen, wie Strahlennetze, geeignet ist [7].

Leitungen im Übertragungsnetz werden in der Regel durch zwei getrennte Schutzeinrichtungen überwacht [8].

3 Mathematische Modellierung elektrischer Netzwerke

Für die algorithmische Auswertung von Schutzsystemen ist es notwendig die zu betrachtenden Netzwerke in erfassbare Strukturen zu wandeln. Hierbei stellt das mathematische Teilgebiet der Graphentheorie Möglichkeiten bereit, Graphen in Matrizen zu fassen. Graphen bestehen stets aus Knoten $K_1, \dots, K_n$ und Kanten $e_1, \dots, e_n$ [9].

Es werden im Folgenden zwei grundlegende Varianten der Graphentheorie in Form von Adjazenz- und Inzidenzmatrix erläutert. Es wird zudem die Variante der Knoten-Terminal-Matrix vorgestellt, welche speziell für die Darstellung von Netzwerken der Energietechnik verwendet wird.

Für alle drei Varianten wird das nachfolgende Beispielnetz mit 5 Knoten und Kanten bzw. Leitungen, Abbildung 3.1, verwendet. Es werden zudem für jede Kante die zugehörigen Richtungen durch Pfeile gekennzeichnet. Die Anzahl der Kanten n_L schwankt je nach Modellierungsmethode bzw. Betrachtung der Richtungen.

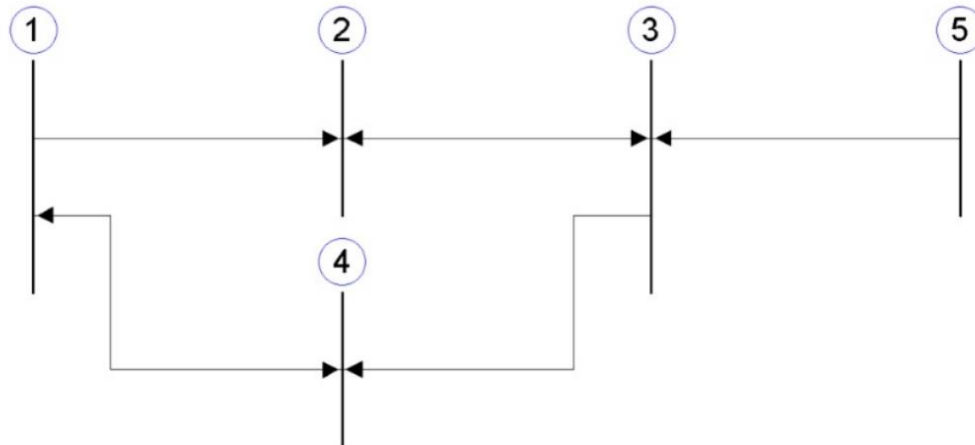


Abbildung 3.1 5-Knoten-Beispielnetz

3.1 Adjazenzmatrix

Für die Umwandlung des Graphen in die Adjazenzmatrix A werden jeweils die benachbarten, also durch eine Kante verbundenen Knoten, betrachtet. Es handelt sich um eine quadratische Matrix, welche bei ungerichteten Graphen zudem symmetrisch ist und deren Größe sich nach der Anzahl der Knoten n_K richtet. Die Matrix $A=[a_{i,j}]$ wird gebildet mit

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{falls } K_i \text{ und } K_j \text{ verbunden sind} \\ 0, & \text{sonst [9].} \end{cases} \quad (3.1)$$

Besonders für die Darstellung elektrischer Netzwerke reicht die allgemeine Form nicht aus, da hierbei keine Informationen zu den Kanten außer der Lage zwischen den Knoten gespeichert werden können. Es wird daher zusätzlich die Information der Richtungsangabe betrachtet, welche durch Verwendung der gerichteten Matrix miteinbezogen werden kann [10]. Für die Betrachtung von Schutzsystemen ist diese Information notwendig, da Schutzfunktionen in der Regel mit einer Wirkrichtung verbunden sind. Die Zeile des Matricelements gibt dabei den Ursprung einer Verbindung an, während die Spalte das Ziel definiert. Zur besseren Übersicht werden die Kanten in Abbildung 3.2 vollständig dargestellt, die Anzahl der Kanten ist nicht relevant.

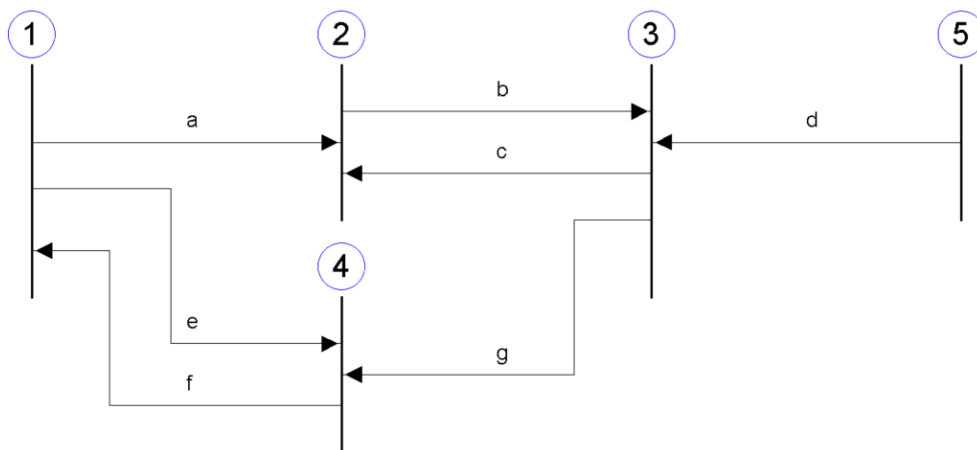


Abbildung 3.2 5-Knoten-Beispielnetz mit vollständiger Darstellung der Kanten

Zur Bildung der Matrix, Formel (3.3), werden die Kantenbeschriftungen von a bis g verwendet. Werden den Kanten des Graphen und demzufolge den Matrixelementen zusätzliche Informationen angefügt, bezeichnet man dies als Wichtung der Kanten bzw. Kantengewicht.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 & e & 0 \\ 0 & 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 & g & 0 \\ f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Es handelt sich bei der dargestellten Matrix um eine gerichtete Adjazenzmatrix mit Kantengewichten.

3.2 Inzidenzmatrix

Für die Bildung der Inzidenzmatrix I wird die Beziehung zwischen Knoten und Kanten betrachtet, die Kanten des Graphen müssen daher in jedem Fall bezeichnet werden. Die Angabe der Richtung einer Kante erfolgt durch Vorzeichen. Wenn die Kante im Knoten beginnt, wird ein positives Vorzeichen angenommen, während ein negatives Vorzeichen verwendet wird, wenn die Kante im Knoten endet. Die Bildungsvorschrift für die ungerichtete Inzidenzmatrix wird angegeben mit

$$I = [a_{i,j}] \quad (3.3)$$

und

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{falls } K_i \text{ ein Endknoten von } e_j \text{ ist} \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases} \quad (3.4)$$

bzw. für die gerichtete Inzidenzmatrix mit

$$a_{i,j} = \begin{cases} -1, & \text{falls } K_i \text{ in } e_j \text{ beginnt} \\ 1, & \text{falls } K_i \text{ in } e_j \text{ endet} \\ 0, & \text{sonst [9].} \end{cases} \quad (3.5)$$

Für die Betrachtung des Beispiels werden keine weiteren Spezifikationen am Graphen benötigt, es kann daher der Graph, Abbildung 3.2, aus Abschnitt 3.1 herangezogen werden. Insbesondere bei Bildung der gerichteten Inzidenzmatrix werden Kanten mit zwei Richtungsangaben aufgeteilt in je eine Kante für die jeweilige Richtung, die Anzahl der Kanten im Beispiel steigt daher von 5 auf 7. Auf die Verwendung von Kantengewichten zur Bildung der Matrix, Formel (3.6), wird verzichtet.

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.3 Knoten-Terminal-Matrix

Während die Bildung der bisherigen Matrizen die Betrachtung von Knoten und Kanten einschloss, wird bei der Knoten-Terminal-Matrix $\mathbf{B}$ jeweils der Anfang und das Ende einer Kante, das sogenannte Terminal T, in Verbindung zu einem Knoten betrachtet. Die Definition der Knoten-Terminal-Matrix lautet:

$$\mathbf{B} = [a_{i,j}] \quad (3.7)$$

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{falls } K_i \text{ an } T_j \text{ liegt} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (3.8)$$

Zu beachten ist, dass die Terminals auf einer Strecke fortlaufend nummeriert werden müssen, da sonst kein Rückschluss auf die Verbindung der Knoten untereinander möglich ist, Abbildung 3.3. Eine Betrachtung der Kanten nach Richtungen ist nicht notwendig, daher kann die Anzahl der Kanten wiederum auf 5 verringert werden. Die Anzahl der Terminals n_T entspricht der doppelten Anzahl der Kanten.

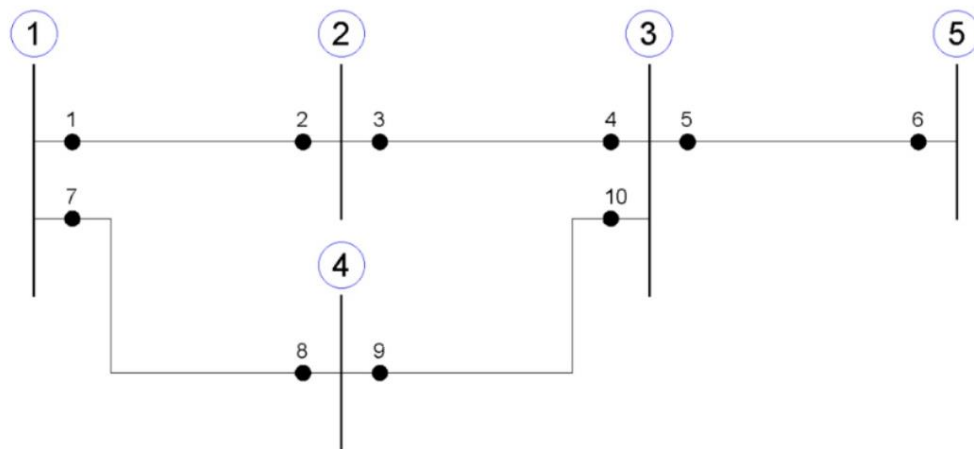


Abbildung 3.3 5-Knoten-Beispielnetz mit Terminals

Die Zuordnung der Kanten erfolgt indirekt, durch Kenntnis der Lage der Terminals an den Knoten und der festgelegten, fortlaufenden Nummerierung der Terminals. Die Zeilen der Matrix, Formel (3.9), entsprechen den Knoten des Graphen, während die Spalten der Matrix den Terminals des Graphen entsprechen.

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.4 Vergleich der Varianten

Für die weitere algorithmische Umsetzung des Bewertungssystems wird die Methode der Adjazenzmatrix verwendet. Der Grund hierfür besteht zum einen in der Dimension der Matrix, welche lediglich durch die Anzahl der Knoten beeinflusst wird und dementsprechend maximal der Dimension der Inzidenzmatrix entspricht und stets kleiner der Dimension der Knoten-Terminal-Matrix ist. Des Weiteren werden zur Beschreibung des Graphen keine zusätzlichen Elemente, wie Terminals oder aufgeteilte Kanten für je eine Richtung, benötigt. Ein weiterer Vorteil gegenüber der Inzidenzmatrix besteht zudem in der Richtungsangabe ohne Vorzeichen.

Die Darstellung eines Graphen mittels Adjazenzmatrix stellt somit in Bezug auf verschiedene Eigenschaften, zusammengefasst in Tabelle 3.1 dargestellt, die einfachste Methode zur Wandlung von Netzwerken dar.

Tabelle 3.1 Vergleich der Modellierungsmethoden

Eigenschaften	Adjazenz	Inzidenz	Knoten-Terminal
Graphen-Elemente	Knoten	Knoten/Kanten	Knoten/Terminals
Dimension	$n_K \times n_K$	$n_K \times n_L$	$n_K \times n_T$
Dimension Beispielmatrix	5×5	5×7	5×10
Gerichtete Matrix	ja	ja	nein
Art der Richtungsangabe	Matrizelement	Vorzeichen	-
Kantengewicht	ja	ja	nein

4 Bewertungssystem

Für die Bewertung der Schutzsysteme können zunächst mehrere Anforderungen definiert werden. Es soll zum einen möglich sein, verschiedene Systeme bzw. Systemzustände zu bewerten und diese zu vergleichen. Dies soll trotz verschiedener Bewertungskriterien möglichst durch eine einfache Aussage oder einen Zahlenwert erfolgen. Es soll dadurch ermöglicht werden, selbst komplexe Schutzsysteme, ohne die detaillierte Kenntnis des Aufbaus und der einzelnen Komponenten, schnell einzuordnen und vergleichbar zu machen.

Eine weitere Anforderung ist die Definition eines Idealzustandes bzw. maximal erreichbaren Zustands für die Einteilung der Bewertung. Betrachtet man als Beispiel die Energieeffizienzklassen für Haushaltsgeräte, Abbildung 4.1, wird ersichtlich, dass die ursprüngliche Klasseneinteilung von A bis G im Nachhinein erweitert wurde. Grund für die Erweiterung ist die Benutzung eines Referenzgerätes, welches zum Zeitpunkt der ursprünglichen Einteilung den Stand der Technik widerspiegelte. Durch technische Entwicklung wurde die Referenz letztlich verändert und die Klassen A⁺ bis A⁺⁺⁺ eingeführt, Abbildung 4.1. Die Bewertung von Geräten und vor allem der Vergleich ist aufgrund dieser Entwicklung deutlich erschwert und verliert an Aussagekraft.



Abbildung 4.1 Energieeffizienzklassen von Haushaltsgeräten nach [11]

Als positives Gegenbeispiel kann die Einordnung von Windkraftanlagen durch Leistungsbeiwerte angeführt werden. Hierbei wird die von der Windkraftanlage erzeugte bzw. theoretisch erzeugbare Leistung ins Verhältnis gesetzt zur Windleistung. Das Maximum der entnehmbaren Energie kann definiert werden und wurde durch „Albert Betz“ nachgewiesen, eine Änderung oder Erweiterung des Bewertungssystems ist daher nicht notwendig [12]. Es ist daher möglich Anlagen aus unterschiedlichen technischen Entwicklungsständen und verschiedenartige Anlagen miteinander zu vergleichen.

Bezogen auf die Bewertung von Schutzsystemen muss daher ein Zustand definiert werden, welcher als Referenz bzw. maximaler Wert der Absicherung herangezogen werden kann. Der maximale Wert der Absicherung erfolgt dabei nicht nach dem Prinzip des maximal realisierbaren, sondern des notwendigen Schutzes. Wird der als notwendiger Schutz definierte Zustand erreicht, gilt das System als sicher.

4.1 Bewertung von Schutzsystemen

Die Absicherung einer Strecke bzw. eines Stromkreises im Höchstspannungsnetz muss durch den Hauptschutz innerhalb einer Auslösezeit von 150ms erfolgen. Bei Nichtauslösung des Hauptschutzes muss eine Auslösung innerhalb von maximal 400ms durch den Reserveschutz realisiert werden [8]. Es wird dementsprechend eine Absicherung mit Haupt- und Reserveschutz und der Einhaltung der Auslösezeiten angenommen. Werden diese Kriterien für sämtliche Strecken des betrachteten Netzes erfüllt, wird das Netz als abgesichert angesehen. Der genannte Zustand wird dementsprechend als optimal angenommen und es erfolgt eine Bewertung mit 100%.

Für die weitere Bewertung wird eine Wichtung der einzelnen Kriterien angestrebt. Eine erste Betrachtung der grundlegenden Kriterien bestehend aus Haupt- und Reserveschutz legt nahe, diese gleich zu priorisieren und mit 50% zu bewerten. Jedoch die Tatsache, dass die eigentliche Schutzaufgabe dem Hauptschutz obliegt und der Reserveschutz lediglich bei Versagen des Hauptschutzes ansprechen soll, führt zu der Erkenntnis die Prioritäten anders zu verteilen. Der Hauptschutz wird daher mit 60% und der Reserveschutz mit 40% angelegt. Zudem wird unterschieden zwischen Vorhandensein des Schutzes und Einhaltung der zugehörigen Auslösezeit. Die Einhaltung der Auslösezeiten entspricht dabei jeweils einer Wertung von 10% für Haupt- und Reserveschutz und somit 20% insgesamt, Tabelle 4.1. Der Grundgedanke ist, dass bei Absicherung eines Netzes ohne Reserveschutz und Einhaltung der Auslösezeiten eine Bewertung von 50% erreicht werden kann, wenn alle Strecken mit Hauptschutz ausgestattet sind.

Tabelle 4.1 Bewertungssystem mit Angabe der Prozentsätze

Kategorie	Kriterium	Bewertung in %
Hauptschutz	Schutzgeräte	50
	Auslösezeit	10
	Gesamt	60
Reserveschutz	Schutzgeräte	30
	Auslösezeit	10
	Gesamt	40

Die Berechnung der Bewertung für das jeweilige Kriterium erfolgt gebunden an die Anzahl der zutreffenden Strecken durch Bilden des Verhältnisses. Im Beispiel zur Berechnung der Bewertung des Hauptschutzes R_H , Formel (4.1), wird die Anzahl der Kanten mit Hauptschutz b im Verhältnis zur Anzahl der Kanten n_L des Netzes betrachtet.

$$R_H = \frac{b}{n_L} \cdot 50\% \quad (4.1)$$

4.2 Bewertungssystem anhand eines Beispiels

Zur Veranschaulichung der Bewertung wird das optimale Schutzsystem für das Beispielnetz, Abbildung 4.2, mit drei Knoten und zwei Leitungen demonstriert. Die Betrachtung der Leitungen erfolgt in beide Richtungen, es wird davon ausgegangen, dass die Energieflussrichtung verändert werden kann.

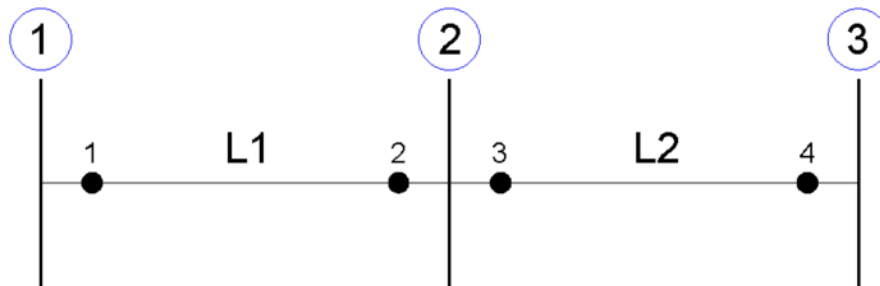


Abbildung 4.2 3-Knoten-Beispielnetz

Zunächst werden alle 4 Terminals mit Schutzgeräten, zum Beispiel Distanzschutzgerät, ausgestattet, welche die Leitungen jeweils in Richtung des gegenüberliegenden Knotens überwachen. Die Auslösung der direkt überwachten Leitungen erfolgt in Schnellzeit. Des Weiteren überwachen die Schutzgeräte, wenn möglich, die nachfolgende Leitung mit Auslösung in größerer Staffelzeit. Dies erfolgt für die Leitung 2 durch das Schutzgerät an Terminal 1 und für Leitung 1 durch das Schutzgerät an Terminal 4 jeweils in Richtung der nachfolgenden Leitung. Für den Reserveschutz der beiden Leitungen in Richtung ohne vorgelagerte Staffelstufe werden zusätzliche unabhängige Schutzgeräte vorgesehen, wie beispielsweise ein zusätzlicher Differentialschutz.

Mit der beschriebenen Schutzgeräte-Ausstattung, Tabelle 4.2, wird das Netz anhand des beschriebenen Bewertungssystems als ausreichend geschützt angesehen und daher mit 100% bewertet.

Tabelle 4.2 Schutzgeräte-Ausstattung des Beispielnetzes

Kategorie	Leitung	Richtung	Einbauort	Auslösung
Hauptschutz	L1	K1 nach K2	T1	Schnellzeit (max. 150ms)
		K2 nach K1	T2	
	L2	K3 nach K4	T3	
		K4 nach K3	T4	
Reserveschutz	L1	K2 nach K1	T4	Verzögert (max. 400ms)
		K1 nach K2	T1/T2	
	L2	K2 nach K3	T1	
		K3 nach K2	T3/T4	

5 Umsetzung in Matlab

Die programmtechnische Umsetzung erfolgt aus verschiedenen Gründen in Matlab. Zum einen kann auf eine Vielzahl von Befehlen zur Bearbeitung von Matrizen und Vektoren zurückgegriffen werden, wie der *find*-Funktion, welche die Zeile und die Spalte von Matrixelementen größer Null ausgibt [13]. Zum anderen wird die Programmiersprache C mit vereinfachter Syntax verwendet.

5.1 Anforderungsdefinition

Das zu erstellende Programm in Matlab soll die durch Matrizen eingegebenen Netzstrukturen in Bezug auf Netzgeräte-Ausstattung und Einhaltung der Auslösezeiten überprüfen und eine Bewertung des Netzes nach Kapitel 4 ausgeben. Es soll zudem eine Überprüfung der Strukturen und Daten auf Plausibilität erfolgen. Beispielsweise falsch angegebene Auslösezeiten für nicht vorhandene Kanten bzw. Strecken sollen nach Möglichkeit nicht in die Bewertung einfließen, da dies eine Verfälschung zur Folge hätte. Die Verknüpfung mit einer real existierenden Anlage ist nicht vorgesehen, weshalb die Abarbeitung des Programms an keine zeitlichen Vorgaben gebunden ist.

5.2 Eingangsdaten

Die Eingabe der Daten zur Struktur des Netzes und der Schutzsysteme erfolgt mit Hilfe von Adjazenzmatrizen, siehe Abschnitt 3.1. Allerdings ermöglichen diese nicht die Speicherung von mehr als einer Information je Strecke und Richtung, weshalb für jede Eigenschaft des Systems, wie etwa den Auslösezeiten des Hauptschutzes, eine separate Matrix verwendet wird. Die Eingangsdaten werden für das nachfolgende Beispielnetz, Abbildung 5.1, dargestellt.

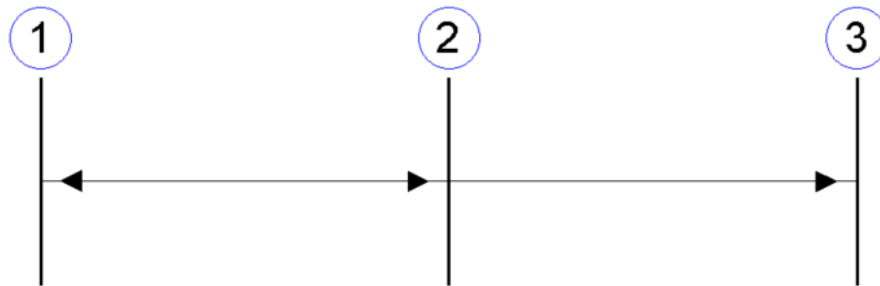
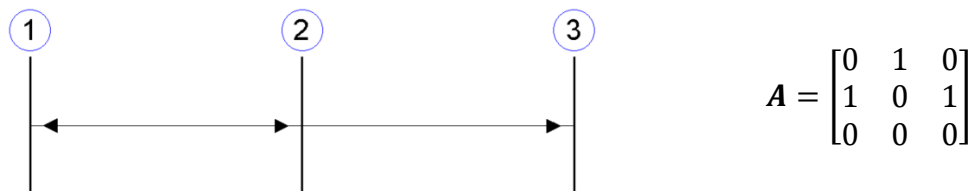


Abbildung 5.1 3-Knoten-Beispielnetz

5.2.1 Netzstruktur

Die Eingabe der Netzstruktur erfolgt durch eine gerichtete Adjazenzmatrix ohne Kantengewichte, beschrieben werden ausschließlich die verbundenen Knoten mit Richtungsangabe nach allgemeiner Definition, Abschnitt 3.1. Die Netzstruktur-Matrix, Abbildung 5.2, wird im Programm mit A bezeichnet.

Abbildung 5.2 Netzstruktur-Matrix A des 3-Knoten-Beispielnetzes

5.2.2 Schutzsystem

Das Schutzsystem wird ebenfalls durch eine gerichtete Adjazenzmatrix abgebildet, jedoch in modifizierter Form. Es wird hierbei unterschieden zwischen Haupt- und Reserveschutz. Die grünen Pfeile in Abbildung 5.3 stellen die Absicherung einer Strecke mit **Hauptschutz** dar. Innerhalb der Schutz-Matrix X ist die Position des Hauptschutzes

(grün dargestellt) gleich der Position der zu überwachenden Strecke in der Netzstruktur-Matrix, da es sich um direkte Absicherung handelt. Bei Absicherung jeder Strecke des Netzes mit Hauptschutz und ohne Betrachtung des Reserveschutzes, gilt $A=X$.

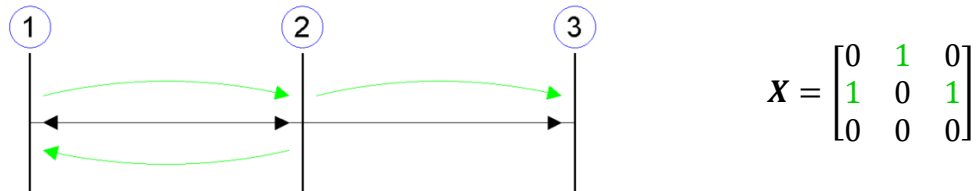


Abbildung 5.3 Schutz-Matrix X mit Hauptschutz

Für die Darstellung des **Reserveschutzes** ausgehend von einem vorgelagerten Schutzgerät wird eine Kante bzw. Strecke herangezogen, welche nicht im ursprünglichen Netzwerk enthalten ist. Die so entstandene Kante wird charakterisiert durch den Knoten mit Lokalisierung des Schutzgeräts als Ursprung und dem Endknoten, der zu schützenden Strecke. Überwacht gegebenenfalls ein Schutzgerät mit Lokalisierung an Knoten 1 die Kante 2 nach 3 entspricht dies dem Matrixelement $a_{1,3}$, Abbildung 5.4. Die Strecke 1 nach 2 wird durch ein zusätzliches Schutzgerät für den Reserveschutz abgesichert, da kein vorgelagertes Schutzgerät vorhanden ist.

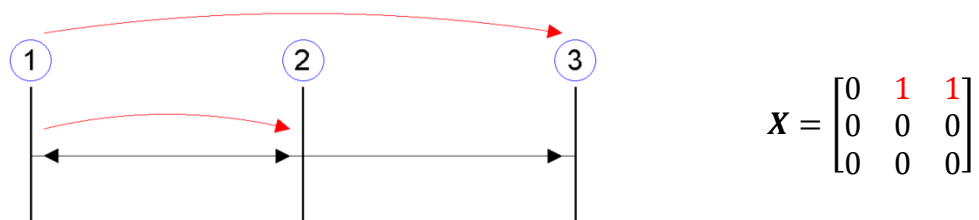


Abbildung 5.4 Schutz-Matrix X mit Reserveschutz

Für die Darstellung des gesamten Schutzsystems in Matrix X , Formel (5.1), wird für Strecken mit unabhängigen Schutzgeräten für Haupt- und Reserveschutz der Wert „2“ vorgesehen.

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

5.2.3 Auslösezeiten

Auf Grundlage der Schutz-Matrix werden die Matrizen für die Zeiten von Haupt- und Reserveschutz angelegt, Abbildung 5.5. Getrennte Matrizen sind notwendig, da bei Ausstattung einer Strecke mit zwei unabhängigen Schutzgeräten die Angabe unterschiedlicher Auslösezeiten notwendig wird. Eine Aufteilung erfolgt nach Hauptschutz T_1 und Reserveschutz T_2 . Die Bildung der Matrizen und der zusätzlichen Strecken für den Reserveschutz, erfolgt simultan zur Schutz-Matrix X mit Angabe der Auslösezeiten in Millisekunden als Kantengewicht, Abbildung 5.5.

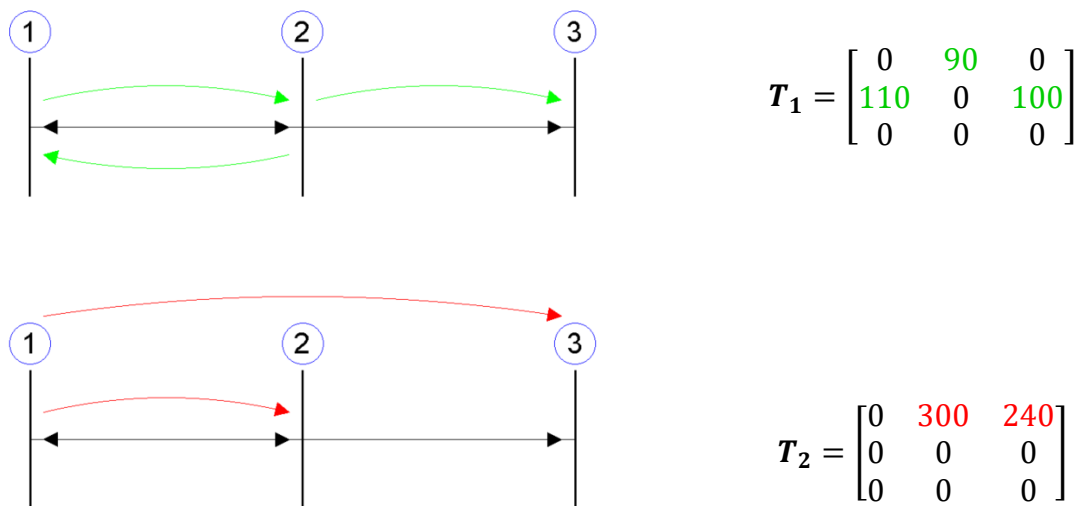


Abbildung 5.5 Auslösezeiten für Hauptschutz T_1 und Reserveschutz T_2

5.3 Ausgangsdaten

Aufgrund der Ausrichtung des Programms auf Bewertung von Schutzsystemen ist der zentrale Ausgabewert das Ergebnis der Bewertung R in Prozent, genaue Erklärung Abschnitt 4.1. Zusätzlich werden klärende Angaben zum Ergebnis ausgegeben, welche die einzelnen Punkte der Bewertung in Form von Teilergebnissen verständlicher gestalten. Dies ist vor allem notwendig, um zu erkennen, welche der betrachteten Parameter für das jeweilige Ergebnis verantwortlich sind bzw. an welcher Stelle

Optimierungsbedarf besteht. Die Auswertung der jeweiligen Teilergebnisse wird dabei mit Hilfe der *fprintf*-Anweisung formatiert und in Text eingebunden ausgegeben [14]. Im Beispiel, Abbildung 5.6, wird die Berechnung und Ausgabe des Hauptschutzes für dargestellt.

```
% Hauptschutz

if b==n_L
    R=R+0.5
else
    R=R+(b/n_L)*0.5
end

fprintf('Hauptschutz: %2.0f von %2.0f Strecken sind geschützt.', b, n_L)
```

Abbildung 5.6 Berechnung und Ausgabe der Hauptschutz-Bewertung

Zusätzlich kann die Ausgabe durch Dialog-Fenster bzw. *Dialog Boxes* erweitert werden, diese können für verschiedene Anwendungen wie Warnungen oder Fehlermeldungen zum Einsatz kommen [15]. Besonders für den Vorgang der Programmierung sind Fehlermeldungen für möglicherweise falsch dimensionierte Eingangs-Matrizen sehr hilfreich. Selbsterdachte Fehlermeldungen sorgen dabei für eine beschleunigte Fehlererkennung, besonders nach Änderungen am Programm.

Die Programmabschnitte der Dialog-Fenster und formatierten Ausgabe werden in der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt.

5.4 Umsetzung

Die Programmierung in Matlab erfolgt durch Orientierung an Netzstrukturen. Während zunächst einfache Netzwerke in Bezug auf Struktur und Größe betrachtet werden, wird die Komplexität der Netzwerke gesteigert bis möglichst eine Bewertung stark vermaschter Strukturen, wie beispielsweise die IEEE-Testnetze, möglich wird.

5.4.1 Erste Programmversion

Die erste Version des Programms, Anhang A, basiert auf der Betrachtung von Strahlennetzen ohne Verzweigungen und mit wenigen Knoten. Es wird der Ansatz

verfolgt, dass die Elemente der eingegeben Matrizen abgezählt und verglichen werden können. Für das elementweise durchlaufen der Matrizen werden ineinander geschachtelte *for*-Schleifen verwendet, mit den Laufvariablen *i* für Zeilen und *j* für Spalten. Durch die Verwendung von *for*-Schleifen werden Abläufe für eine bestimmte Anzahl wiederholt [16]. Die Zahl der Wiederholungen richtet sich nach der Anzahl der Knoten des Netzes n_K . Diese werden mit Hilfe der Anweisung *size*, welche die Anzahl der Elemente größer Null eines Felds bzw. einer Matrix ausgibt [14], für die Matrix *A* ermittelt.

a) Programmbeschreibung

Die Erkennung des **Hauptschutzes**, Abbildung 5.7, basiert dabei auf dem elementweisen Vergleich zwischen den Matrizen *A* und *X*. Mit Hilfe von *if*-Anweisungen, welche eine Bedingung darstellen [17], wird sichergestellt, dass die Kanten mit Schutzgerät in *X* einer Kante in *A* zugeordnet werden können, Abbildung 5.7.

```

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if A(i,j)>=1
            n_L=n_L+1
        end
        if A(i,j)==X(i,j) && A(i,j)==1
            b=b+1
        end
        if X(i,j)==2 && A(i,j)==1
            b=b+1
        end
    end
end

```

Abbildung 5.7 Hauptschutz der ersten Programmversion

Die Variable *b* gibt nach Ablauf der Schleifen die Anzahl der Kanten mit Absicherung durch Hauptschutz wieder, während die Anzahl der Kanten des Netzes durch n_K erfasst wird. Zur Ermittlung der Kanten mit Hauptschutz werden mehrere *if*-Bedingungen verwendet, da je nach Absicherung der Strecke unterschiedliche Zahlenwerte zum Einsatz kommen, siehe Abschnitt 5.2.2. Aufgrund der gebundenen Erfassung von *b* werden die Möglichkeiten der Falsch-Bewertung für den Hauptschutz begrenzt, da sowohl Eintragungen in *A* als auch in *X* vorhanden sein müssen.

Für die Überprüfung des **Reserveschutzes** wird ein ähnliches Prinzip verwendet. Zunächst wird die Matrix *X* dahingehend verändert, dass sämtliche Elemente des Hauptschutzes auf den Wert Null gesetzt werden, Abbildung 5.8, anschließend erfolgt eine reine Zählung der übrigen Elemente größer Null der neu entstandenen Matrix *X₁*,

Abbildung 5.8. Die Elemente, welche durch die Variable b_1 erfasst werden, bilden alle Strecken mit Reserveschutz des Netzes ab.

```

X1=X % Schutz-Matrix ohne Hauptschutz

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if A(i,j)==X(i,j) && A(i,j)==1
            X1(i,j)=0
        end
        if X(i,j)==2 && A(i,j)==1
            X1(i,j)=1
        end
    end
end

b1=0; % Anzahl der Kanten mit Reserveschutz

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if X1(i,j)==1
            b1=b1+1
        end
    end
end

```

Abbildung 5.8 Reserveschutz der ersten Programmversion

Die Erzeugung der Matrix X_1 bietet zudem Vorteile bei der manuellen Überprüfung des Reserveschutzes, zum Beispiel bei Ergebnissen der Bewertung, welche in Bezug auf die Anzahl der Strecken unplausibel erscheinen.

Des Weiteren erfolgt die Überprüfung der **Auslösezeiten** gespeichert in den Matrizen T_1 und T_2 . Es werden jeweils die Kanten für Haupt- und Reserveschutz durch Abgleich mit den vorgegebenen Auslösezeiten, Abbildung 5.9, erfasst.

```

% Hauptschutz

t=0;          % Anzahl der Kanten mit Auslösezeit-Hauptschutz

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if T1(i,j) <= 150 && T1(i,j) ~= 0
            t=t+1
        end
    end
end

% Reserveschutz

t1=0;         % Anzahl der Kanten mit Auslösezeit-Hauptschutz

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if T2(i,j) <= 400 && T2(i,j) ~= 0
            t1=t1+1
        end
    end
end

```

Abbildung 5.9 Auslösezeiten der ersten Programmversion

Die Variablen zur Erfassung der Auslösezeiten werden ebenfalls unterteilt in Hauptschutz t und Reserveschutz t_1 .

b) Bewertungsbeispiel

Die Datei mit Eingabedaten, Anhang H, welche im Programm, aufgerufen wird, enthält ein Strahlennetz mit 5 Stationen und ohne Verzweigungen. Es werden sämtliche Strecken des Netzes in beiden Richtungen betrachtet, Abbildung 5.10.

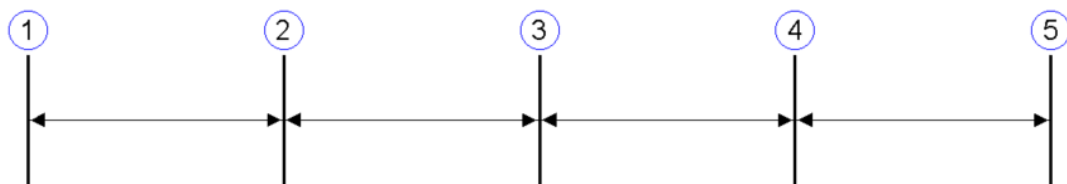


Abbildung 5.10 Netzstruktur Input-5-Stationen

Auf Grundlage der eingegebenen Matrizen aus Datei Input-5-Stationen wird die folgende Bewertung erzielt, Tabelle 5.1. Es besteht vollständige Absicherung des Netzes mit Hauptschutz. Der Reserveschutz besteht Gerätetechnisch für drei Kanten.

Tabelle 5.1 Bewertungsbeispiel Input-5-Stationen

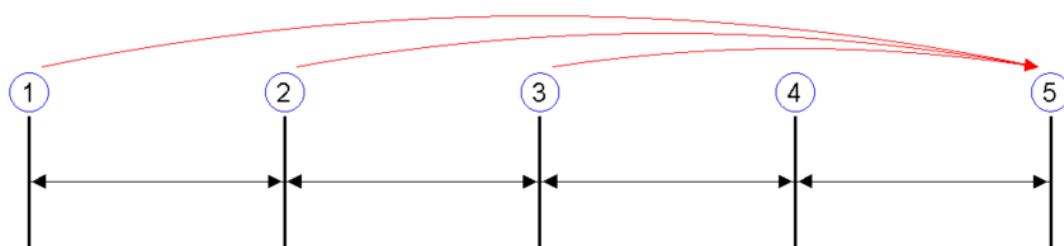
Kategorie	Kriterium	Anzahl der Kanten	Bewertung in %
Hauptschutz	Schutzgeräte	8 von 8	50
	Auslösezeit	8 von 8	11,25
Reserveschutz	Schutzgeräte	3 von 8	10
	Auslösezeit	2 von 8	2,5
Gesamt-Bewertung			73,75

Die Bewertung der Auslösezeiten des Reserveschutzes unterscheidet sich zur Geräteausstattung, aufgrund eines überhöhten Wertes für die Kante 5 nach 2 mit $a_{5,2}=450\text{ms}$, siehe Anhang H. Es werden dementsprechend lediglich zwei Kanten für die Bewertung der Auslösezeiten des Reserveschutzes berücksichtigt.

c) Problemstellungen

Bei der Bewertung von Netzwerken mit plausiblen Eingangsdaten kann von unverfälschten Ergebnissen ausgegangen werden. Allerdings sollten auch Maßnahmen zur Fehlererkennung bzw. Berichtigung von Überbewertungen getroffen werden.

Ein grundlegendes Thema besonders in Bezug auf das Ergebnis der Bewertung ist hierbei die Nicht-Erkennung von Strecken mit mehrfachem Reserveschutz durch reine Erfassung der Anzahl von Kanten. Wird eine Strecke von mehreren vorgelagerten Schutzgeräten überwacht, siehe Abbildung 5.11, werden diese miterfasst und die Bewertung so verfälscht.

**Abbildung 5.11** Input-5-Stationen mit Mehrfachabsicherung

Durch Mitzählen des mehrfachen Reserveschutzes kann das Ergebnis einer Bewertung dahingehend beeinflusst werden, dass wiederum trotz mehrerer Strecken ohne zusätzliche

Absicherung ein besseres Ergebnis erzielt wird bzw. eine Bewertung mit mehr als 100 % möglich wird. Ein Überblick der real abgesicherten Strecken ist nicht möglich.

Des Weiteren wird die Überprüfung der Auslösezeiten lediglich in Bezug auf die vorgegebenen Maximalwerte vorgenommen, Abbildung 5.9, weshalb auch an dieser Stelle eine Verfälschung der Bewertung durch zusätzliche Eintragungen in den Matrizen T_1 und T_2 erfolgen kann.

5.4.2 Zweite Programmversion

Aufgrund der vorher genannten Problemstellungen der ersten Programmversion werden insbesondere die Abschnitte des Reserveschutzes und der Auslösezeiten überarbeitet bzw. erweitert. Zudem soll zusätzlich die Betrachtung von verzweigten Netzen möglich sein. Es werden daher zunächst Unterteilungen in sogenannte *functions* oder Funktionen vorgenommen. Diese Unterprogramme sind nicht selbstständig lauffähig, sondern werden innerhalb des *script*, welches als Hauptprogramm angesehen werden kann, mit Angabe der Ein- und Ausgabedaten, aufgerufen. Die Vorteile der Programmierung mit Hilfe von Funktionen liegen zum einen in der Übersichtlichkeit der Programmierung, da für jede Teilaufgabe eine Funktion angelegt werden kann. Zudem wird bei Programmierfehlern lediglich der Ablauf der Funktion beeinträchtigt, während der Rest des Programms weiter genutzt werden kann. Des Weiteren kann eine erstellte Funktion beliebig in verschiedenen Programmen aufgerufen werden, durch Zuweisung der Eingabedaten bei jedem Funktionsaufruf, runde Klammer in Abbildung 5.12, ist keine Anpassung der Funktion notwendig. Außerdem besitzen Funktionen einen eigenen Arbeitsbereich, weshalb Variablen, welche nicht als Ausgabeargumente, eckige Klammer in Abbildung 5.12, deklariert werden, lediglich lokal gespeichert werden und daher keine Variablen im *workspace* bzw. Basisarbeitsbereich überschreiben [18][19].

```
function [y1,...,yN] = myfun(x1,...,xM)
```

Abbildung 5.12 Funktionsaufruf in Matlab nach [18]

a) Programmbeschreibung

Die Überprüfung des Hauptschutzes erfolgt nach Vorgehensweise der ersten Programmversion, Abschnitt 5.4.1, und wird daher nicht erläutert. Allerdings wird der

Abschnitt des Hauptschutzes nicht mehr im Programm direkt bearbeitet, sondern durch die Funktion *Hauptschutz* aufgerufen, Anhang C.

Anschließend erfolgt die Bearbeitung des Reserveschutzes, die ebenfalls in einer Funktion behandelt wird, Anhang D. Die ursprüngliche Programmierung aus der ersten Version des Programms, Abschnitt 5.4.1, wird hierbei erweitert, sodass zusätzlich die mehrfache Absicherung einer Strecke bzw. Kante erkannt und in der Bewertung berücksichtigt wird. Ebenso wie in der vorherigen Version wird zunächst die Matrix X_1 durch nullsetzen der Elemente des Hauptschutzes erzeugt. Für die weitere Betrachtung wird X_1 aufgeteilt in Dreiecksmatrizen. Die Anweisung $X_2 = \text{triu}(X_1)$ erzeugt die obere Dreiecksmatrix, wobei sämtliche Matrixelemente unterhalb der Hauptdiagonalen auf den Wert „0“ gesetzt werden. Simultan wird die untere Dreiecksmatrix mit $X_3 = \text{tril}(X_1)$ gebildet [20][21], Anhang D.

Im Anschluss wird die Anzahl der Kanten mit Reserveschutz durch Abzählen ermittelt, ebenso wie in der vorherigen Programmversion ist die Variable b_1 fehlerbehaftet, da zunächst sämtliche Kanten mit Reserveschutz, ohne Prüfung enthalten sind. Die nachfolgenden Funktionsabschnitte sollen mehrfache Absicherung von Kanten erkennen und von b_1 subtrahieren, Anhang D.

Die Erkennung des Mehrfach-Schutzes, wird unterteilt in zwei zu betrachtende Fälle, zum einen mehrfache Absicherung bei unverzweigten Knoten mit maximal zwei Verbindungen zu anderen Knoten, Beispiel Knoten 2 in Abbildung 5.13, und der mehrfachen Absicherung an Knoten mit Verzweigung, Beispiel Knoten 3 in Abbildung 5.13.

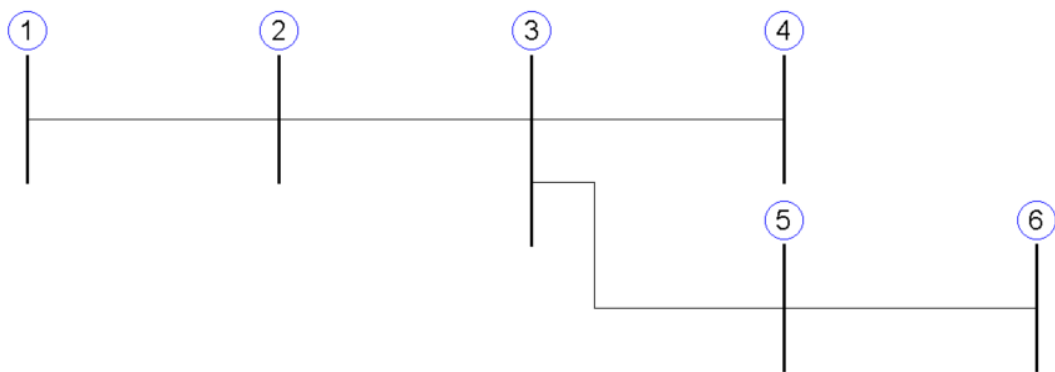


Abbildung 5.13 Input-6-Stationen

Generell basiert die Erkennung des mehrfachen Reserveschutzes auf der Betrachtung von Matrix-Spalten. Innerhalb der einfachen *for*-Schleife, werden die Spalten der Matrizen A , X_1 , X_2 und X_3

durchlaufen und jeweils die Anzahl der Kanten aus den Spaltenvektoren a , x_1 , x_2 und x_3 für den jeweiligen Knoten ermittelt,

Abbildung 5.14.

```
for i=1:n_K;

    % Anzahl der Kanten mit Reserveschutz in Spalte i

    x1=X1(:,i)
    x1l=size(find(x1),1)

    % Anzahl der Kanten mit Reserveschutz in Spalte i der Matrix X2

    x2=X2(:,i)
    x2l=size(find(x2),1)

    % Anzahl der Kanten mit Reserveschutz in Spalte i der Matrix X3

    x3=X3(:,i)
    x3l=size(find(x3),1)

    % Anzahl der Kanten in Spalte i

    a=A(:,i)
    al=size(find(a),1)
```

Abbildung 5.14 Anzahl der Kanten

Zur Erkennung der mehrfachen Absicherung an unverzweigten Knoten, Abbildung 5.15, wird die Anzahl der Kanten aus den Spaltenvektoren der Dreiecksmatrizen X_2 und X_3 verwendet. Grund hierfür ist die richtungsgebundene Betrachtung des Reserveschutzes. Beispielshalber Knoten 2 aus Abbildung 5.13 liegt an zwei Kanten zu den Knoten 1 und 3, welche unabhängig voneinander abgesichert werden. Die richtungsgebundene Erfassung ist dementsprechend notwendig.

```
% Kanten mit mehrfachem Reserveschutz, ohne Verzweigung am Knoten

if x2l>1 && a1<=2
    b2=b2+(x2l-1)
end

if x3l>1 && a1<=2
    b2=b2+(x3l-1)
end
```

Abbildung 5.15 Reserveschutz an unverzweigtem Knoten

Die Anzahl der überflüssigen Kanten wird durch die Variable b_2 gespeichert und folgend von b_1 subtrahiert, Abbildung 5.15.

Als Beispiel wird die Absicherung der Kante 3 nach 2 aus dem Beispielnetz Input-6-Stationen, Abbildung 5.13, betrachtet, wobei die Absicherung ausgehend von den Knoten 3 und 4 erfolgt. Es ergibt sich daher der Spaltenvektor $\mathbf{x}_3$ der unteren Dreiecksmatrix $\mathbf{X}_3$. Die Bildung der Spaltenvektoren wird für $i=2$ vorgenommen, da alle Kanten, welche in Knoten 2 enden, betrachtet werden, Abbildung 5.16.

$$\mathbf{x}_3(i=2) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{a}(i=2) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$x_{31} = 2 \qquad a_1 = 2$$

$$b_2 = 1$$

Abbildung 5.16 Spaltenvektoren $\mathbf{x}_3$ und $\mathbf{a}$ für Knoten 2

Aufgrund der Anzahl der Kanten a_1 in Spaltenvektor $\mathbf{a}$, wird Knoten 2 als unverzweigt erkannt. Die Anzahl der Kanten mit Reserveschutz x_{31} aus Spaltenvektor $\mathbf{x}_3$ der unteren Dreiecksmatrix $\mathbf{X}_3$ beträgt „2“, wodurch eine Kante mit Reserveschutz in b_2 gespeichert wird.

Als nächstes folgt die Betrachtung der Kanten mit Reserveschutz für verzweigte Knoten. Es ist hierbei nicht notwendig richtungsgebunden mit Hilfe von Dreiecksmatrizen vorzugehen. Es werden lediglich, bei Detektieren eines verzweigten Knotens, die Spaltenvektoren der Matrizen $\mathbf{A}$ und $\mathbf{X}_1$ mit Hilfe einer zusätzlichen *for*-Schleife durchlaufen, Abbildung 5.17.

```

% Kanten mit mehrfachem Reserveschutz, Verzweigung am Knoten

if x11>1 && a1>2

    for k=1:n_K
        if a(k)==1 && k>i % unterhalb der Hauptdiagonale
            x4=0
        end
        if x1(k)==1
            x4=x4+1
        end
        if x4>1
            b3=b3+(x4-1)
        end
        if a(k)==1 && k<i % oberhalb der Hauptdiagonale
            x4=0
        end
    end
end
end
end

```

Abbildung 5.17 Reserveschutz an verzweigtem Knoten

Während des elementweisen Durchlaufens der Spaltenvektoren wird die Variable x_4 erzeugt. Diese wird bei Erkennung einer Kante mit Reserveschutz im Spaltenvektor $\mathbf{x}_1$ der Schutz-Matrix $\mathbf{X}_1$ um den Wert „1“ erhöht bzw. bei Erkennung eines neuen Zweigs durch eine Kante in Spaltenvektor $\mathbf{a}$ richtungsgebunden auf den Wert „0“ gesetzt. Sobald x_4 einen Wert größer eins erreicht, wird die Anzahl der Kanten mit mehrfachem Reserveschutz durch die Variable b_3 gespeichert und später von b_4 subtrahiert.

Als Beispiel wird Knoten 3 des Beispielnetzes Input-6-Stationen, Abbildung 5.13, betrachtet, welcher mit insgesamt drei anderen Knoten verbunden ist. Geht man davon aus, dass eine Absicherung mit Reserveschutz der an Knoten 3 liegenden Kanten von allen anderen Knoten aus stattfindet, ergibt sich der Spaltenvektor $\mathbf{x}_1$ in Abbildung 5.18. Dem gegenüber steht der Spaltenvektor $\mathbf{a}$ der Netzstruktur-Matrix $\mathbf{A}$, Abbildung 5.18.

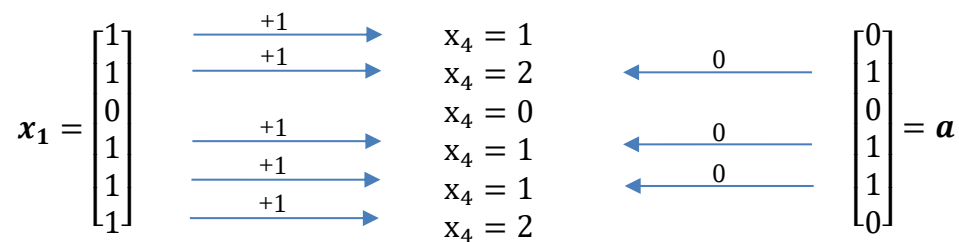


Abbildung 5.18 Funktionsprinzip des Reserveschutzes bei Verzweigungen

Der erste Zweig des Netzes besteht aus den Knoten 1 und 2, wodurch für die Kante 2 nach 3 doppelte Absicherung mit Reserveschutz vorliegt, Abbildung 5.13. Die Kanten des Zweigs werden durch x_4 erfasst, an b_3 weitergegeben und anschließend wird x_4 auf den Wert Null gesetzt, da laut Spaltenvektor $\mathbf{a}$ ein neuer Netzzweig folgt, Abbildung 5.18.

Der Netzzweig mit Knoten 4 wird nicht berücksichtigt, da lediglich einfache Absicherung möglich ist. Zuletzt wird die Absicherung der Kante 5 nach 3 betrachtet, hierbei wird die doppelte Absicherung ebenfalls erkannt und durch b_4 gespeichert. Das Ergebnis nach Durchlaufen der Spaltenvektoren ergibt $b_4=2$, es werden daher 2 Kanten innerhalb der Bewertung nicht berücksichtigt.

Weitere Ergänzungen am Programm, unabhängig von der Funktion Reserveschutz, bestehen zum einen in der zusätzlichen Prüfung der Eingabedaten. Es werden hierbei die Matrizen auf Gleichheit der Dimension geprüft und gegebenenfalls eine Warnung ausgegeben, Anhang B. Des Weiteren werden sämtliche Elemente der Matrizen mit Auslösezeiten mit den Matrizen der Netzstruktur für Hauptschutz bzw. der Schutz-Matrix für Reserveschutz verglichen und gegebenenfalls auf den Wert Null gesetzt. Es wird dadurch verhindert, dass Auslösezeiten für nicht überwachte Kanten in die Bewertung einfließen, Anhang B.

b) Bewertungsbeispiel

Das Bewertungsbeispiel Input-6-Stationen, Anhang I, beinhaltet ein Netzwerk, Abbildung 5.13, bestehend aus 6 Knoten mit einer Verzweigung. Die Verbindungsstrecken zwischen den Knoten werden jeweils in beiden Richtungen betrachtet.

Aufgrund der modifizierten Programmierung des Reserveschutzes werden die Eingabedaten so gewählt, Abbildung 5.19, dass eine Bewertung durch die erste Programmversion fehlerbehaftet erfolgen würde.

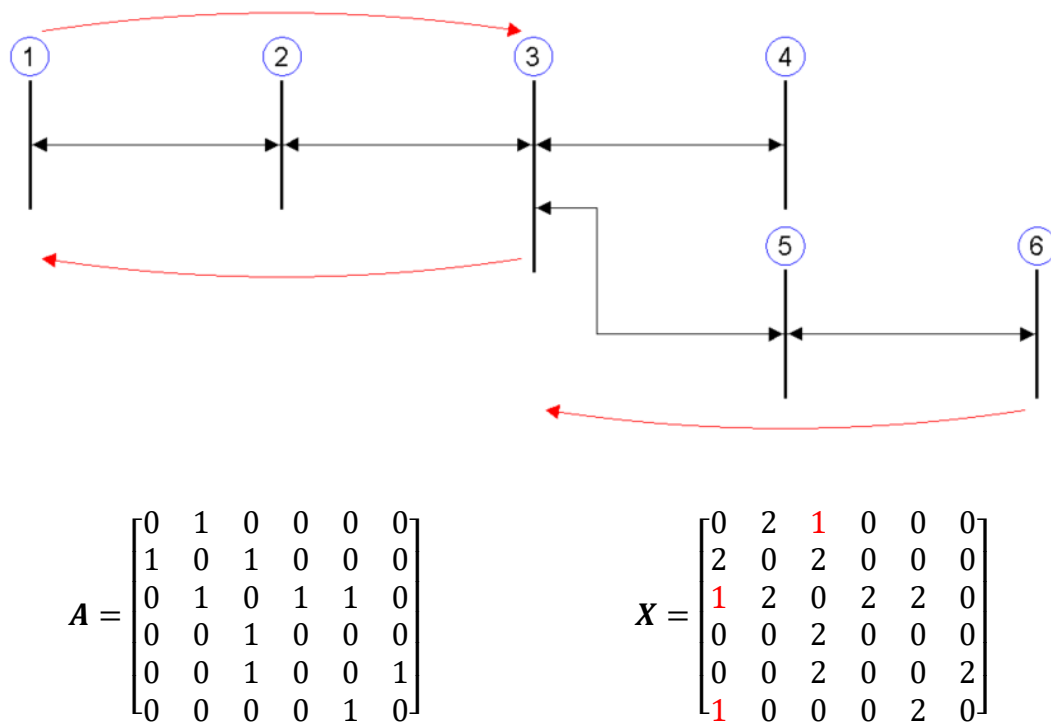


Abbildung 5.19 Eingabedaten Input-6-Stationen

Sämtliche Kanten des Netzes werden zunächst von zwei unabhängigen Schutzgeräten für Haupt- und Reserveschutz abgesichert. In Verbindung mit den Daten der Auslösezeiten, Anhang I, ergibt sich für die Absicherung des Netzes eine Bewertung von 100%, auch bei Eingabe in die erste Programmversion. Hinzukommen drei Kanten mit mehrfachem Reserveschutz, in Abbildung 5.19 dargestellt durch rote Pfeile bzw. rote Ziffern in X , welche in Programmversion 1 eine Bewertung von mehr als 100% bewirkt hätten.

Aufgrund der Änderungen in der Abarbeitung des Reserveschutzes erfolgt keine Falsch-Bewertung des Netzwerkes. Das vollständige Ergebnis der Bewertung kann Tabelle 5.2 entnommen werden.

Tabelle 5.2 Bewertungsbeispiel Input-6-Stationen

Kategorie	Kriterium	Anzahl der Kanten	Bewertung in %
Hauptschutz	Schutzgeräte	10 von 10	50
	Auslösezeit	10 von 10	10
Reserveschutz	Schutzgeräte	10 von 10	30
	Auslösezeit	10 von 10	10
Gesamt-Bewertung			100

c) Problemstellungen

Durch Erweiterung des Reserveschutzes ist es möglich in einfachen Netzwerken mehrfach abgesicherte Kanten zu erkennen und diese der Bewertung zu entziehen. Allerdings basiert die Erkennung auf der Annahme, dass die Nummerierung bzw. Zuweisung der Knoten fortlaufend erfolgt und keine vermaschte Struktur vorliegt. Allein durch Abänderung der Knoten-Nummerierung des Beispielnetzes Input-6-Stationen, Abbildung 5.20, wäre die Erkennung von Mehrfach-Kanten nicht mehr möglich.

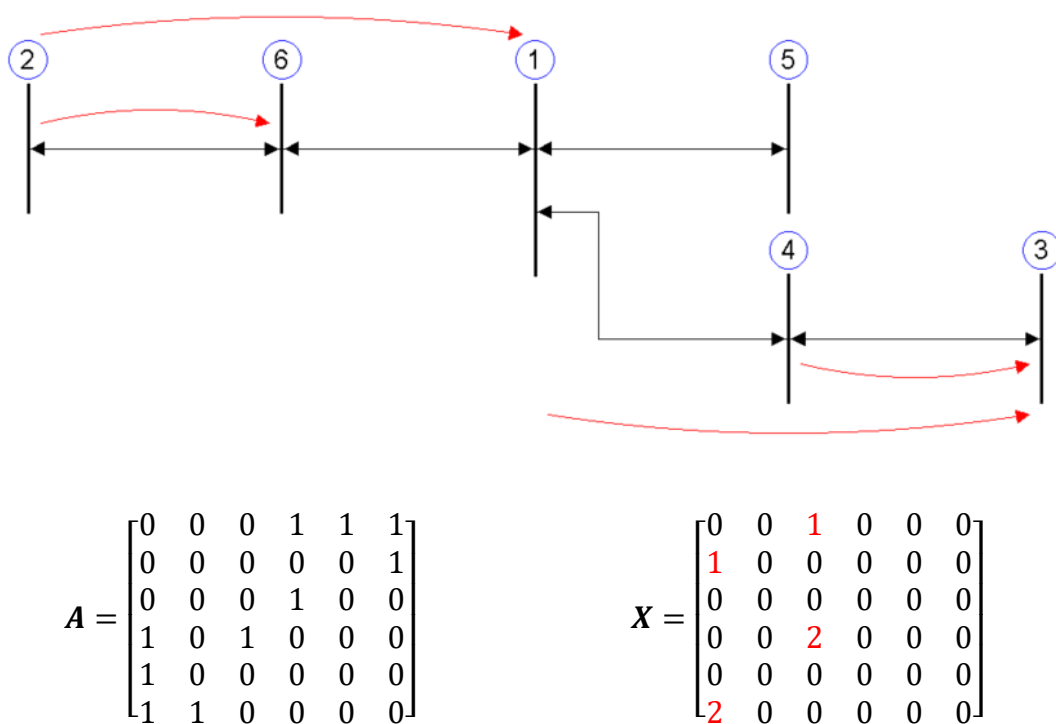


Abbildung 5.20 Problemstellung Input-6-Stationen

Für die beispielhafte Betrachtung des Netzwerkes Input-6-Stationen werden lediglich die Kanten, welche in Abbildung 5.20 durch rote Pfeile bzw. rote Ziffern in der Matrix X gekennzeichnet sind, verwendet. Hauptschutz entfällt gänzlich bzw. wird lediglich für die direkt abgesicherten Kanten mitangegeben, da diese sonst nicht als zusätzlicher Reserveschutz erkannt werden.

Zunächst wird die mehrfache Absicherung der Kante 4 nach 3 nicht als solche erkannt. Grund hierfür ist die Aufteilung der Schutzmatrix ohne Hauptschutz X_1 in die Dreiecksmatrizen X_2 und X_3 zur richtungsgebundenen Betrachtung der Kanten, Formeln (5.2) und (5.3). Allerdings werden hierbei, durch die veränderte Nummerierung der

Knoten, unterschiedliche Wirkrichtungen angenommen und dementsprechend jeweils nur eine Kante je Richtung der Spalten 3 detektiert.

$$X_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \color{red}{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$X_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \color{red}{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \color{red}{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \color{red}{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Wiederum die Betrachtung des verzweigten Knotens 1 durch Spalte 1 der Matrix X_1 ist durch fehlerhaftes Nullsetzen der Variable x_4 gekennzeichnet, Abbildung 5.21.

$$x_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \xrightarrow{+1} \\ \xrightarrow{+1} \end{array} \quad \begin{array}{l} x_4 = 0 \\ x_4 = 1 \\ x_4 = 1 \\ x_4 = 0 \\ x_4 = 0 \\ x_4 = 1 \end{array} \quad \begin{array}{l} \xleftarrow{0} \\ \xleftarrow{0} \\ \xleftarrow{0} \end{array} \quad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = a$$

Abbildung 5.21 Problemstellung verzweigter Knoten

Die Variable x_4 erreicht dementsprechend keinen Wert größer eins, wodurch auch an dieser Stelle ein verfälschtes Ergebnis erzielt wird. Im Ergebnis der Bewertung sind daher sämtliche Kanten berücksichtigt, obwohl jeweils zwei der Kanten die gleiche Strecke im Netzwerk schützen, was zur Folge hat, dass die Bewertung nicht die realen Verhältnisse widerspiegelt.

Infolgedessen ergibt sich die Fragestellung, ob die Programmierung anhand von Strukturen innerhalb der Matrix sinnvoll erscheint. Typische Strukturen wie Diagonalen innerhalb der Matrix bei Strahlennetzen oder Aufteilung der Matrixelemente nach Wirkrichtungen in den Dreiecksmatrizen werden bei zufälliger Nummerierung oder Vermaschung durchbrochen und der Algorithmus daher unbrauchbar. Der Abgleich des Hauptschutzes erfolgt elementweise und ist daher nicht betroffen.

Darüber hinaus bedarf auch die Betrachtung der Auslösezeiten insbesondere für den Reserveschutz zusätzlicher Erkennung mehrfacher Absicherung. Aufgrund der ähnlich gearteten Problemstellung erfolgt zunächst lediglich eine weitere Analyse der Schutzgeräte-Ausstattung.

5.4.3 Dritte Programmversion

Sämtliche Betrachtungen der dritten Programmversion beziehen sich auf die Problematik des Reserveschutzes in Bezug auf die Erkennung von Mehrfach-Absicherung. Programmabschnitte wie die Betrachtung des Hauptschutzes und der Auslösezeiten werden nicht verändert und können der Zweiten Programmversion, Abschnitt 5.4.2 bzw. Anhang B, entnommen werden.

Im Gegensatz zu den bisherigen Programmversionen erfolgt keine Auswertung anhand von Strukturen oder Mustern innerhalb der Matrizen, sondern durch Orientierung an den Strukturen des Netzes. Es soll dadurch möglich sein, Absicherung in Bezug auf den Reserveschutz für vermaschte Netze und zufällige Nummerierung der Knoten auszuwerten.

a) Programmbeschreibung

Das Programm Bewertung Version 3, Anhang E, enthält lediglich den Programmabschnitt für die Auswertung des Reserveschutzes als eigenständig lauffähiges Programm bzw. *script*, da die restlichen Programmabschnitte nicht betrachtet werden.

Im Folgenden wird zur Beschreibung des Programms und dem anschließenden Bewertungsbeispiel das 9 Bus Testnetz des Western System Coordinating Council (WSCC), Abbildung 5.22 bzw. Anhang K, verwendet.

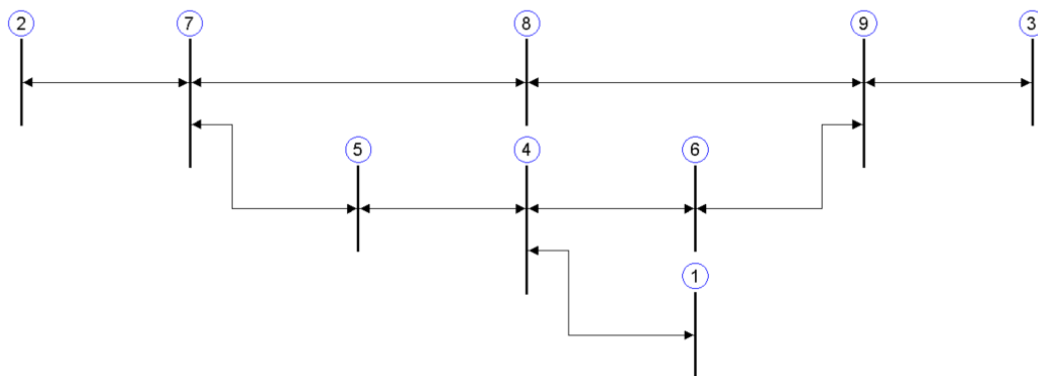


Abbildung 5.22 WSCC 9-Knoten-Testnetz nach [22]

Es wird für die Betrachtung lediglich die Struktur des Netzes ohne Abgänge und Generatoren verwendet, zusätzliche, in der ursprünglichen Version, Anhang K, enthaltene Informationen wie die Angabe von Leistungen werden nicht benötigt.

Innerhalb des Programms werden zwei Abschnitte nach Absicherung einer Kante durch Reserveschutz unterschieden, direkte Absicherung durch zusätzlichen Reserveschutz und

indirekte Absicherung einer Kante durch vorgelagerten Reserveschutz. Die Herangehensweise ist für beide Abschnitte ähnlich und orientiert sich dabei an der realen Struktur des Netzes. Ebenso wie in den vorangegangenen Programmversionen wird zunächst die bereinigte Schutz-Matrix X_I erzeugt. Anschließend erfolgt die Bearbeitung der direkten Absicherung, Abbildung 5.23, durch den elementweisen Vergleich der Schutz-Matrix X_I und der Netzstruktur-Matrix A .

```

%% Variante 1: direkte Überwachung der Kante

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if X1(i,j)==A(i,j) && A(i,j)==1

            b1=b1+1
            X1(i,j)=0

            % 1.Staffelung

            a=A(:,i)
            a(j)=0
            [z,s]=find(a)
            X1(z,j)=0

            % 2.Staffelung

            a=A(:,z)
            a(i,:)=0
            [z,s]=find(a)
            X1(z,j)=0

        end
    end
end

```

Abbildung 5.23 direkte Absicherung einer Kante

Erfüllt ein Matricelement die Bedingung für die direkte Absicherung, Abbildung 5.23, wird dieses in der Variablen b_1 erfasst und das Element nachfolgend auf den Wert Null gesetzt, um zu verhindern, dass die Kante nochmals erfasst wird. Aus diesem Grund werden zudem die vorherigen Staffelfstufen nullgesetzt, damit diese ebenfalls nicht für die weitere Betrachtung herangezogen werden. Durch Abrufen des Spaltenvektors a des Knotens mit Positionierung des Schutzgeräts, werden die übrigen Verbindungen zu anderen Knoten, mit Ausnahme des Knotens am Ende der überwachten Kante, mit Hilfe der *find*-Anweisung erkannt. Es werden dann sämtliche Matricelemente aus X_I auf den Wert Null gesetzt, die von einem Knoten, mit Verbindung zum Knoten des Schutzgeräts, zum Endknoten der überwachten Kante verlaufen. Die Zweite Stufe der Staffelung betrachtet wiederum alle danach folgenden Kanten nach selbem Schema.

Als Beispiel wird die Absicherung der Kante 6 nach 4 aus dem Beispielnetz, Abbildung 5.22, betrachtet, welche direkt von Knoten 6 und indirekt von Knoten 9 aus überwacht wird, Formel (5.4). Das grün dargestellte Matricelement stellt hierbei die direkte

Absicherung der Kante dar und wird nach der Erfassung durch b_1 nullgesetzt, während das rot dargestellte Matrixelement durch die Betrachtung der zweiten Staffelung erkannt und nullgesetzt wird. Dementsprechend wird trotz mehrfacher Absicherung der Kante eine verfälschte Bewertung vermieden. Die Betrachtung erfolgt anhand der realen Netzwerk-Struktur.

$$X_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Im Gegensatz zum Programmabschnitt der direkten Überwachung wird die indirekte Überwachung spaltenweise statt elementeweise abgearbeitet. Außerdem werden zusätzlich zwei Fälle der Absicherung unterschieden, welche sich nach der Anzahl der Kanten x_2 in der jeweiligen Spalte der Matrix X_1 richten.

Für den Fall der einfachen Absicherung, Abbildung 5.24, wird zunächst die Matrix A_{11} , durch Abrufen der Spalten für die Verbindungen zur aktuellen Spalte a_1 , gebildet. Auf diese Weise wird die nächste Stufe der Staffelung innerhalb der Netzstruktur-Matrix betrachtet. Für die so entstandene Matrix werden die enthaltenen Kanten aufgeschlüsselt nach Zeilen z und Spalten s , durch verwenden der *find*-Anweisung, ermittelt. Anschließend folgt der Abgleich der Netzstruktur für die erste Stufe der Staffelung durch Verwenden des Vektors z mit den abgesicherten Kanten x_1 , Abbildung 5.24.

```

%% Variante 2.1: ein Schutzgerät in Spalte i

if x2==1

    % 1.Staffelung

    A11=A(:,a1)
    [z,s]=find(A11)
    x1==z
    x3=size(find(ans),1)
    if x3>=1
        b1=b1+1
    end

    % 2.Staffelung

    if x3==0
        A12=A(:,z)
        [z2,s2]=find(A12)
        x1==z2
        c1=size(find(ans),1)
        if c1>=1
            b1=b1+1
        end
    end
end
end

```

Abbildung 5.24 indirekte, einfache Absicherung einer Kante

Die Anweisung *determine equality* bzw. $x_1==z$ prüft die eingegebenen Felder bzw. *arrays* auf Gleichheit und gibt in der Variable **ans** wiederum ein Feld bzw. einen Vektor aus, mit dem Wert „1“ für Elemente mit Übereinstimmung und dem Wert „0“ bei unterschiedlichen Elementen [23]. Die Antwort-Variable **ans** wird von Matlab automatisch erzeugt, falls kein Ausgabe-Argument für eine Operation definiert wird [24]. Durch Ermitteln der Anzahl an Elementen gleich eins innerhalb der Variable **ans**, wird festgestellt ob die Kanten der Schutz-Matrix mit der Netzstruktur übereinstimmen bzw. eine Verbindung zwischen den Knoten besteht, Abbildung 5.24. Bei mindestens einer Übereinstimmung wird die Kante durch die Variable b_1 erfasst. Die nächste Stufe der Staffelung wird durch Bilden der Matrix A_{12} mit Hilfe des Vektors z erreicht, die nachfolgende Betrachtung erfolgt nach gleichem Prinzip.

Der Programmabschnitt zur Überprüfung des Reserveschutzes bei mehrfachen Kanten bzw. Schutzgeräten erfolgt ebenfalls nach gleichem Prinzip, durch Abgleich der Netzstruktur mit den vorhandenen Kanten der Schutz-Matrix. Aufgrund von mehrfachen Schutzgeräten bzw. Kanten innerhalb der Spalte von X_1 wird die *determine equality*-Anweisung für zwei Vektoren angewendet, wodurch die Variable **ans** eine Matrix wiedergibt. Es werden daher, im Gegensatz zum vorherigen Abschnitt, *for*-Schleifen für die Prüfung von **ans** verwendet.

Aufgrund des gleichen Grundprinzips der Programmierung, werden die nachfolgenden Abschnitte nicht erläutert. Allerdings kann dem Anhang F der Programmablauf für die dritte Programmversion entnommen werden.

b) Bewertungsbeispiel

Für die dritte Programmversion wird keine vollständige Bewertung eines Beispielnetzes vorgenommen, es wird lediglich die Erkennung von mehrfachem Reserveschutz anhand der Datei WSCC 9-Knoten-Testnetzes, Anhang J, geprüft.

Sämtliche Strecken bzw. Kanten des Netzwerks werden zunächst direkt durch Haupt- und Reserveschutz abgesichert, in Formel (5.5) grün dargestellt. Zusätzlich erfolgt die Absicherung von verschiedenen vorgelagerten Knoten aus, in Formel (5.5) rot dargestellt.

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 2 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Trotz der mehrfach abgesicherten Strecken wird für die Variable b_1 ein Wert von „18“ ausgegeben, dies entspricht der Anzahl der im Netz enthaltenen Kanten bei Annahme von jeweils zwei Richtungen. Dementsprechend werden Kanten mit mehrfachem Schutz nicht in die Betrachtung einbezogen. Es ist daher möglich Netze anhand der realen Verknüpfungen schutztechnisch zu bewerten.

5.4.4 Problemstellung IEEE-Testnetz

Infolge der Prüfung des Programms mit den IEEE-Testnetzen ergibt sich eine Problemstellung der unzureichenden Eingabedaten. Aufgrund der verbesserten Übersichtlichkeit wird die Problematik anhand des WSCC 9-Knoten-Testnetzes, welches durch eine Strecke zwischen den Knoten 7 und 6, rote Kante in Abbildung 5.25, erweitert wird, dargestellt.

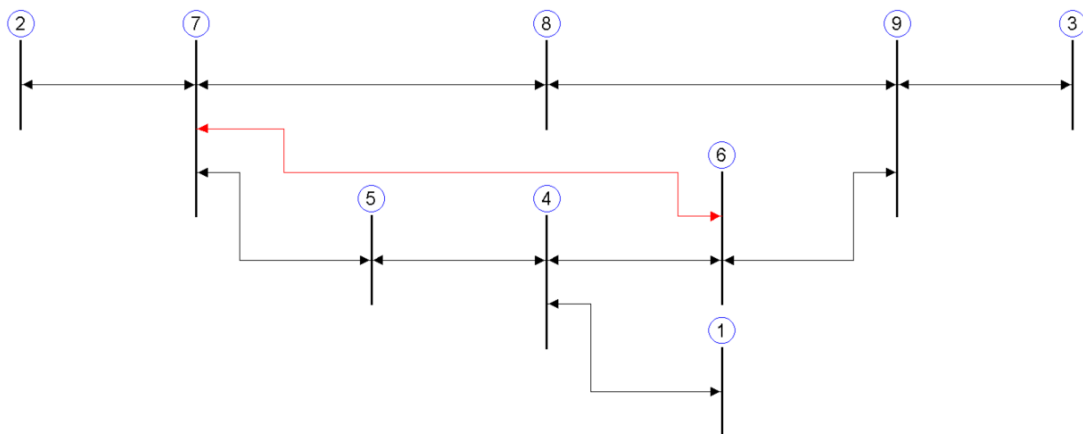


Abbildung 5.25 WSCC 9-Knoten-Testnetz mit Erweiterung

Durch die Erweiterung des Netzes entsteht zwischen den Knoten 7 und 6 eine Direktverbindung. Zudem existieren indirekte Verbindungen, zum Beispiel über die Knoten 4 und 5. Die Darstellung der hinzugefügten Kante innerhalb der Netzstruktur-Matrix A kann nach allgemeiner Bildungsvorschrift erfolgen, Formel (5.6), während die Abbildung sämtlicher Schutzstrecken innerhalb der Matrix X nicht möglich ist, Formel (5.7).

Soll beispielsweise eine Absicherung mit Hauptschutz und Reserveschutz für die Kante 7 nach 6 erfolgen ist diese innerhalb der Schutz-Matrix X darstellbar, in Formel (5.7) rot dargestellt. Sollen allerdings weitere Kanten zwischen den Knoten 7 und 6 abgesichert werden, wie zum Beispiel die Kante 4 nach 6 durch ein vorgelagertes Schutzgerät mit Lokalisierung an Knoten 7, so können diese nicht abgebildet werden. Grund hierfür ist die Speicherung von Knotenverbindungen innerhalb eines Matricelements, welche lediglich durch Kantengewichte erweitert werden kann.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \textcolor{red}{1} & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & \textcolor{red}{1} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \textcolor{red}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

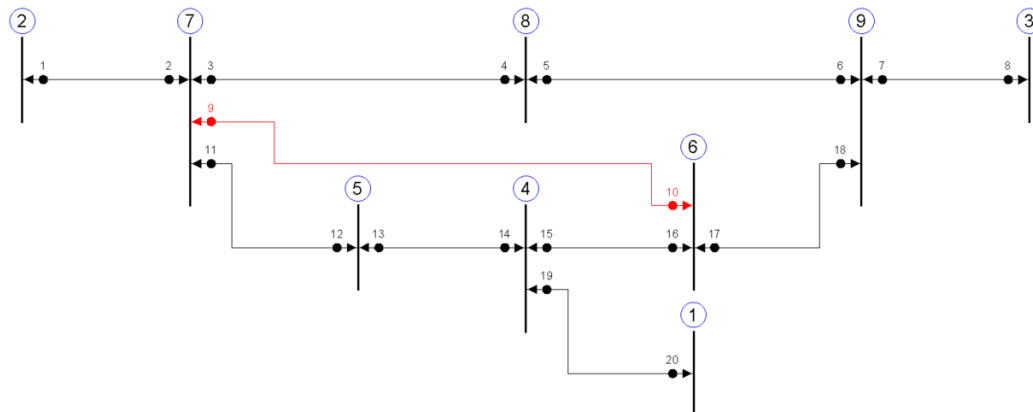
Für die Unterscheidung von direkter und indirekter Absicherung zwischen zwei Knoten in stark vermaschten Netzen ist die Eingabe der Netzstruktur mit Hilfe der Adjazenzmatrix dementsprechend unzureichend. Eine Problemlösung durch programmtechnische Änderungen ist nicht möglich.

5.4.5 Vierte Programmversion

Anhand der vierten Programmversion soll eine Möglichkeit für die Lösung der Problemstellung aus Abschnitt 5.4.4 gegeben werden. Es werden die veränderte Eingabe der Daten, und als Beispiel für die programmtechnische Umsetzung, die Auswertung des Hauptschutzes, erläutert.

a) Eingangsdaten

Zur Eingabe der Netzstruktur wird auf die Variante der Knoten-Terminal-Matrix zurückgegriffen. Am betrachteten WSCC 9-Knoten-Testnetz werden daher die Terminals der Kanten mitberücksichtigt, Abbildung 5.26. Die Bildung der Knoten-Terminal-Matrix erfolgt nach Abschnitt 3.3.



$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Abbildung 5.26 WSCC 9-Knoten-Testnetz mit Erweiterung und Terminals

Aufgrund der Verwendung von Terminals zur Bildung der Matrix, Abbildung 5.26, werden innerhalb der Matrix keine Kanten, sondern ausschließlich die Lage der Terminals an den Knoten, definiert. Zur Darstellung von Schutzstrecken wird daher weiterhin die Methode der Adjazenzmatrix verwendet, allerdings durch Angabe der Verbindung zwischen den Terminals statt zwischen den Knoten. Durch Verwendung der Terminals für die Angabe von Schutzstrecken, kann zwischen unterschiedlichen Verbindungen der selben Knoten unterschieden werden.

In der Schutz-Matrix X , Formel (5.8), wird zum einen die direkte Absicherung der Kante 6 nach 7, in Formel (5.8) rot, sowie die indirekte Absicherung zwischen den Knoten 4 und 6 ausgehend von Knoten 7, in Formel (5.8) grün, dargestellt.

Die Abweichung der Zahlenwerte von Zeile i und Spalte j der Matrix $\mathbf{X}$ darf bei gleicher Kante maximal eine Stelle betragen. Der Abgleich erfolgt für beide Wirkrichtungen, Abbildung 5.27. Bei Erfüllen der Bedingung wird die Kante erfasst und das Matricelement auf den Wert Null gesetzt, damit diese für die mögliche Betrachtung des Reserveschutzes nicht berücksichtigt wird.

Zur Behandlung des Reserveschutzes wird zusätzlich der Abgleich mit der Netzstruktur-Matrix $\mathbf{B}$ notwendig, da eine Verbindung über Knoten hinweg betrachtet werden muss.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Master-Thesis war die Entwicklung einer Bewertung von Schutzsystemen im Höchstspannungs- bzw. Übertragungsnetz. Die Bewertung sollte zudem innerhalb eines Programms erfolgen.

Nach der Klärung grundlegender Begriffe der Schutztechnik und der zu betrachtenden Schutzsysteme, wurde die Eingabe der Netzstrukturen behandelt. Es wurden hierbei verschiedene Arten der Mathematischen Modellierung aufgezeigt und die Bildung der zugehörigen Matrizen erläutert. Letztlich wurden die Methoden der Modellierung gegenübergestellt und eine Variante für die programmtechnische Umsetzung ausgewählt. Im Anschluss wurde ein Bewertungssystem auf Grundlage der Vorgaben für die Planung des Übertragungsnetzes entwickelt und vorgestellt.

Nach Klärung sämtlicher Voraussetzungen, erfolgte die Umsetzung des Programms anhand mehrerer Versionen. Jede der vorgestellten Versionen wurde zunächst beschrieben und auf mögliche Besonderheiten eingegangen. Anschließend wurden die Bewertung sowie der Programmablauf anhand eines Beispiels erläutert. Zuletzt wurden jeweils mögliche Problemstellungen betrachtet, und wenn vorhanden, diese dargelegt. Auf diese Weise konnte gezeigt werden, wie die Programmierung über mehrere Versionen hinweg einen Entwicklungsprozess durchlief. Zudem konnte anhand der verschiedenen Versionen auf unterschiedliche Probleme aufmerksam gemacht und mögliche Lösungen vorgestellt werden.

Zuletzt wurde deutlich, dass die Eingabe der Daten, welche zu Beginn gewählt wurde, für die Bewertung stark vermaschter Netze unzureichend ist. Es wurde daher in der vierten Programmversion ein Vorschlag der veränderten Eingabedaten aufgezeigt und die Programmierung für die Bewertung des Hauptschutzes beispielhaft erläutert.

Zusammenfassend kann daher festgestellt werden, dass die Betrachtung von Schutzsystemen anhand von Matrizen mit Hilfe der Variante der Knoten-Terminal-Matrix erfolgen sollte. Außerdem ist die Orientierung an den realen Strukturen des Netzes, wie in der dritten Programmversion in Abschnitt 5.4.3 angewandt, für die Programmierung notwendig, da Strukturen bzw. Muster innerhalb der Matrix u.a. durch die Nummerierung der Knoten beeinflusst werden und daher nicht zwingend die realen Verhältnisse des Netzes wiedergeben.

Weiterführende Betrachtungen innerhalb des Bewertungssystems können zum einen der Auswertung der Auslösezeiten gelten, zum Beispiel die Überprüfung der Selektivität durch gestaffelte Zeiten von Haupt- und Reserveschutz. Ebenso ist es möglich weitere Kriterien in die Bewertung miteinzubeziehen, wie die Betrachtung von Doppelleitungen oder anders gewichteter Abschnitte mit besonderer Bedeutung für die Versorgungssicherheit. Des Weiteren ist es möglich zusätzlich auf bestimmte Abschnitte

innerhalb eines Systems, z.B. durch Meldungen hinzuweisen, welche trotz ausreichender Absicherung des Gesamtsystems nur mangelhaft geschützt sind.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesnetzagentur: „Bericht der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen über die Systemstörung im deutschen und europäischen Verbundsystem am 04. November 2006“, Bonn, o.J.
- [2] UCTE: „Final Report – System Disturbance on 4 November 2006“, o.J.
- [3] W. Doemeland, K. Götz: „Handbuch Schutztechnik Grundlagen Schutzsysteme Inbetriebsetzung“, Berlin, HUSS-MEDIEN, 2006
- [4] D. Oeding, B.R. Oswald: „Elektrische Kraftwerke und Netze“, Berlin, Springer Vieweg, 2016
- [5] V. Crastan: „Elektrische Energieversorgung 1 Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik“, Berlin, Springer, 2012
- [6] A. Schwab: „Elektroenergiesysteme Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, Karlsruhe, Springer Vieweg, 2017.
- [7] K. Heuck, K.-D. Dettmann, D. Schulz: „Elektrische Energieversorgung Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis“, Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2010
- [8] 50 Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH: „Grundsätze Für Die Ausbauplanung Des Deutschen Übertragungsnetzes“, 2018.
- [9] Hougardy, S., Vygen J.: „Algorithmische Mathematik“, Berlin, Springer Spektrum, 2018.
- [10] S. O. Krumke, H. Noltemeier: „Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen“, Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2009
- [11] Europäisches Parlament: „Energieeffizienz von Haushaltsgeräten: Abgeordnete für ehrgeizigere „A-G“ -Skala“, 2016, [Online], URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20160701IPR34483/energieeffizienz-von-haushaltsgeraten-abgeordnete-fur-ehrgeizigere-a-g-skala>, Abgerufen am: 07.12.19
- [12] Quaschnig, V.: „Regenerative Energiesysteme Technologie-Berechnung-Simulation“, München, Hanser, 2013.
- [13] MathWorks: „find – Find indices and values of nonzero elements“, o.J., [Online], URL: https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/find.html?searchHighlight=find&stid=doc_srchtile, Abgerufen am: 18.09.19

- [14] Adam, S.: „MATLAB und Mathematik kompetent einsetzen – Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler“, Weinheim, WILEY-VCH, 2017
- [15] MathWorks: „Dialog Boxes – Report status, gather user input, and interact with operating system or printer“, o.J., [Online], URL: <https://de.mathworks.com/help/matlab/predefined-dialog-boxes.html>, Abgerufen am: 23.12.19
- [16] MathWorks: „for – for loop to repeat specified number of times“, o.J., [Online], URL: <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/for.html>, Abgerufen am: 27.12.19
- [17] MathWorks: „if,elseif, else – Execute statements if condition is true“, o.J., [Online], URL: https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/if.html?searchHighlight=if%20else&s_tid=doc_srchtile, Abgerufen am: 14.11.19
- [18] MathWorks: „function – Declare function name, inputs, and outputs“, o.J., [Online], URL: <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/function.html>, Abgerufen am: 08.10.19
- [19] MathWorks: „Scripts vs. Functions“, o.J., [Online], URL: https://de.mathworks.com/help/matlab/matlab_prog/scripts-and-functions.html, Abgerufen am: 22.12.19
- [20] Mathworks: „triu – Upper triangular part of matrix“, o.J., [Online], URL: https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/triu.html?searchHighlight=triu&s_tid=doc_srchtile, Abgerufen am: 25.09.19
- [21] Mathworks: „tril – Lower triangular part of matrix“, o.J., [Online], URL: <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/tril.html>, Abgerufen am: 25.09.19
- [22] Illinois Center for a smarter Electric Grid(ISCeG): „WSCC 9-Bus System“, o.J., [Online], URL: <https://icseg.iti.illinois.edu/wsc-9-bus-system/>, Abgerufen am: 23.12.19
- [23] MathWorks: „eq, == - Determine equality“, o.J., [Online], URL: <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/eq.html>, Abgerufen am: 27.12.19
- [24] MathWorks: „ans – most recent answer“, o.J., [Online], URL: <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/ans.html>, Abgerufen am: 18.12.19

A Bewertung Version 1

```

%% Bewertung Version 1

clc;
clear;

% Definition 100% -> Hauptschutz=50%
%               -> Reserveschutz=30%
%               -> Zeiten=20% (Hauptschutz+Reserveschutz)

%% Input

Input_5_Stationen;

% A -> Netzstruktur-Matrix
% X -> Schutz-Matrix
% T1 -> Auslösezeiten-Matrix Hauptschutz
% T2 -> Auslösezeiten-Matrix Reserveschutz

%% Hauptschutz

n_K=size(A,1); % Anzahl der Knoten
n_L=0;         % Anzahl der Kanten
b=0;           % Anzahl der Kanten mit Hauptschutz

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if A(i,j)>=1
            n_L=n_L+1
        end
        if A(i,j)==X(i,j) && A(i,j)==1
            b=b+1
        end
        if X(i,j)==2 && A(i,j)==1
            b=b+1
        end
    end
end

%% Reserveschutz

X1=X % Schutz-Matrix ohne Hauptschutz

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if A(i,j)==X(i,j) && A(i,j)==1
            X1(i,j)=0
        end
        if X(i,j)==2 && A(i,j)==1
            X1(i,j)=1
        end
    end
end
end

```

```
b1=0; % Anzahl der Kanten mit Reserveschutz

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if X1(i,j)==1
            b1=b1+1
        end
    end
end

%% Abschaltzeiten

% Hauptschutz

t=0; % Anzahl der Kanten mit Auslösezeit-Hauptschutz

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if T1(i,j)<=150 && T1(i,j)~=0
            t=t+1
        end
    end
end

% Reserveschutz

t1=0; % Anzahl der Kanten mit Auslösezeit-Reserveschutz

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if T2(i,j)<=400 && T2(i,j)~=0
            t1=t1+1
        end
    end
end

%% Bewertung

R=0; % Ergebnis der Bewertung (Result)

% Hauptschutz

if b==n_L
    R=R+0.5
else
    R=R+(b/n_L)*0.5
end

fprintf('Hauptschutz: %2.0f von %2.0f Strecken sind geschützt.\n\n',
b, n_L)

% Reserveschutz

if b1==n_L
    R=R+0.3
```

```
else
    R=R+(b1/n_L)*0.3
end

fprintf('Reserveschutz: %2.0f von %2.0f Strecken sind geschützt.\n\n',
b1, n_L)

% Auskösezeit Hauptschutz

if t==n_L
    R=R+0.1
else
    R=R+(t/n_L)*0.1
end

fprintf('Auslösezeiten Hauptschutz: %2.0f von %2.0f Strecken sind ge-
schützt.\n\n', t, n_L)

% Auskösezeit Reserveschutz

if t1==n_L
    R=R+0.1
else
    R=R+(t1/n_L)*0.1
end

fprintf('Auslösezeiten Reserveschutz: %2.0f von %2.0f Strecken sind
geschützt.\n\n', t1, n_L)

% Gesamtergebnis

R=R*100

fprintf('Gesamt-Bewertung: %2.0f Prozent.\n\n', R)
```

B Bewertung Version 2

```

%% Bewertung Version 2

clc;
clear;

% Definition 100% -> Hauptschutz=50%
%                               -> Reserveschutz=30%
%                               -> Zeiten=20% (Hauptschutz<=150ms + Reserve-
schutz<=400ms)

%% Input

Input_6_Stationen

% A -> Netzstruktur-Matrix
% X -> Schutz-Matrix
% T1 -> Auslösezeiten-Matrix Hauptschutz
% T2 -> Auslösezeiten-Matrix Reserveschutz

%% Input-Überprüfung

if size(A)==size(X)
    if size(A)==size(T1)
        if size(A)~=size(T2)
            f = error('Dimension der Matrix TR überprüfen.', 'Input Error')
            return
        end
    else
        f = error('Dimension der Matrix TH überprüfen.', 'Input Error')
        return
    end
else
    f = error('Dimension der Matrix X überprüfen.', 'Input Error')
    return
end

%% Hauptschutz

n_K=size(A,1);
n_L=size(find(A),1)

% Funktionsaufruf

[b] = Hauptschutz(A,X,n_K)

%% Reserveschutz

% Funktionsaufruf

[b1] = Reserveschutz(A,X,n_K)

```

```
%% Abschaltzeiten

% Hauptschutz

t=0; % Anzahl der Kanten mit Auslösezeit-Hauptschutz

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if A(i,j)==0
            T1(i,j)=0
        end
        if T1(i,j)<=150 && T1(i,j)>0
            t=t+1
        end
    end
end

% Reserveschutz

t1=0; % Anzahl der Kanten mit Auslösezeit-Reserveschutz

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if X(i,j)==0
            T2(i,j)=0
        end
        if X(i,j)<2 && A(i,j)==1
            T2(i,j)=0
        end
        if T2(i,j)<=400 && T2(i,j)>0
            t1=t1+1
        end
    end
end

%% Bewertung

R=0; % Ergebnis der Bewertung (Result)

% Hauptschutz

if n_L==b
    R=0.5
else
    R=(b/n_L)*0.5
end
fprintf('Hauptschutz: %2.0f von %2.0f Strecken sind geschützt.\n\n',
b, n_L)

% Reserveschutz

if b1==n_L
    R=R+0.3
else
```

```
R=R+(b1/n_L)*0.3
end

fprintf('Reserveschutz: %2.0f von %2.0f Strecken sind ge-
schützt.\n\n', b1, n_L)

% Auslösezeit Hauptschutz
if t==n_L
    R=R+0.1
else
    R=R+(t/n_L)*0.1
end

fprintf('Abschaltzeiten Hauptschutz: %2.0f von %2.0f Strecken sind ge-
schützt.\n\n', t, n_L)

% Auslösezeit Reserveschutz
if t1==n_L
    R=R+0.1
else
    R=R+(t1/n_L)*0.1
end

fprintf('Abschaltzeiten Reserveschutz: %2.0f von %2.0f Strecken sind
geschützt.\n\n', t1, n_L)

% Gesamtergebnis

R=R*100;

fprintf('Gesamt-Bewertung: %2.1f Prozent.\n\n', R)
```

C Bewertung Version 2: Funktion Hauptschutz

```
function [b] = Hauptschutz(A,X,n_K)
%Anzahl der Kanten mit Hauptschutz

b=0;

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if X(i,j)>=1 && A(i,j)==1
            b=b+1
        end
    end
end
end
end
```

D Bewertung Version 2: Funktion Reserveschutz

```
function [b1] = Reserveschutz_2(A,X,n_K)
%% Reserveschutz

% Schutz-Matrix ohne Hauptschutz

X1=X

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if X(i,j)==1 && A(i,j)==1
            X1(i,j)=0
        end
        if X(i,j)==2 && A(i,j)==1
            X1(i,j)=1
        end
    end
end

% Aufteilung der Schutz-Matrix

% obere Dreiecksmatrix
X2=triu(X1)
% untere Dreiecksmatrix
X3=tril(X1)

% Anzahl der Kanten mit Reserveschutz

b1=0;

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if X1(i,j)==1
            b1=b1+1
        end
    end
end

% Erkennung des Mehrfach-Schutzes

b2=0;
b3=0;
x4=0;

for i=1:n_K;

    % Anzahl der Kanten mit Reserveschutz in Spalte i

    x1=X1(:,i)
    x1l=size(find(x1),1)

    % Anzahl der Kanten mit Reserveschutz in Spalte i der Matrix X2
```

```

x2=X2(:,i)
x2l=size(find(x2),1)

% Anzahl der Kanten mit Reserveschutz in Spalte i der Matrix X3

x3=X3(:,i)
x3l=size(find(x3),1)

% Anzahl der Kanten in Spalte i

a=A(:,i)
a1=size(find(a),1)

% Kanten mit mehrfachem Reserveschutz, ohne Verzweigung am Knoten

if x2l>1 && a1<=2
    b2=b2+(x2l-1)
end

if x3l>1 && a1<=2
    b2=b2+(x3l-1)
end

% Kanten mit mehrfachem Reserveschutz, Verzweigung am Knoten

if x1l>1 && a1>2

    for k=1:n_K
        k
        if a(k)==1 && k>i           % unterhalb der Hauptdiagonale
            x4=0
        end
        if x1(k)==1
            x4=x4+1
        end
        if x4>1
            b3=b3+(x4-1)
        end
        if a(k)==1 && k<i           % oberhalb der Hauptdiagonale
            x4=0
        end
    end
end
end

% Anzahl der Kanten mit Reserveschutz ohne mehrfachen Reserveschutz

b1=b1-b2-b3

end

```

E Bewertung Version 3

```

%% Bewertung_Version_3_Reserveschutz

clc
clear

%% Input

%Input_IEEE_14_BUS

%Input_6_Stationen_Versuch

Input_WSCC_9_Knoten_Testnetz

% A -> Netzstruktur-Matrix
% X -> Schutz-Matrix
% T1 -> Auslösezeiten-Matrix Hauptschutz
% T2 -> Auslösezeiten-Matrix Reserveschutz

%% Variablen-Deklaration

n_K=size(A,1)
b1=0
b13=0
A3=A

%% Schutz-Matrix ohne Hauptschutz

X1=X

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if A(i,j)==1
            X1(i,j)=0
        end
        if X(i,j)==2 && A(i,j)==1
            X1(i,j)=1
        end
    end
end

%% Variante 1: direkte Überwachung der Kante

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if X1(i,j)==A(i,j) && A(i,j)==1

            b1=b1+1
            X1(i,j)=0

            % 1.Staffelung

            a=A(:,i)

```

```

        a(j)=0
        [Z,S]=find(a)
        X1(Z,j)=0

        % 2.Staffelung

        a=A(:,Z)
        a(i,:)=0
        [Z,S]=find(a)
        X1(Z,j)=0

    end
end
end

%% Variante 2: indirekte Überwachung der Kante

for i=1:n_K

    x=X1(:,i)
    x1=find(x)
    x2=size(x1,1)

    a=A(:,i)
    a1=find(a)
    a2=size(a1,1)

    %% Variante 2.1: ein Schutzgerät in Spalte i

    if x2==1

        % 1.Staffelung

        A11=A(:,a1)
        [Z,S]=find(A11)
        x1==Z
        x3=size(find(ans),1)
        if x3>=1
            b1=b1+1
        end

        % 2.Staffelung

        if x3==0
            A12=A(:,Z)
            [Z2,S2]=find(A12)
            x1==Z2
            c1=size(find(ans),1)
            if c1>=1
                b1=b1+1
            end
        end
    end

    %% Variante 2.2: mehrere Schutzgräte in Spalte i

    if x2>1

```

```
% 1.Staffelung

b11=0
    b12=0
    A21=A(:,x1)
    [Z2,S2]=find(A21)
    a1'==Z2
    for j=1:a2
        c2=size(find(ans(:,j)),1)
        b12=b12+c2
        if c2>=1
            b11=b11+1
            a11=a1(j)
            A3(:,a11)=0
        end
    end

b13=b11

% 2.Staffelung

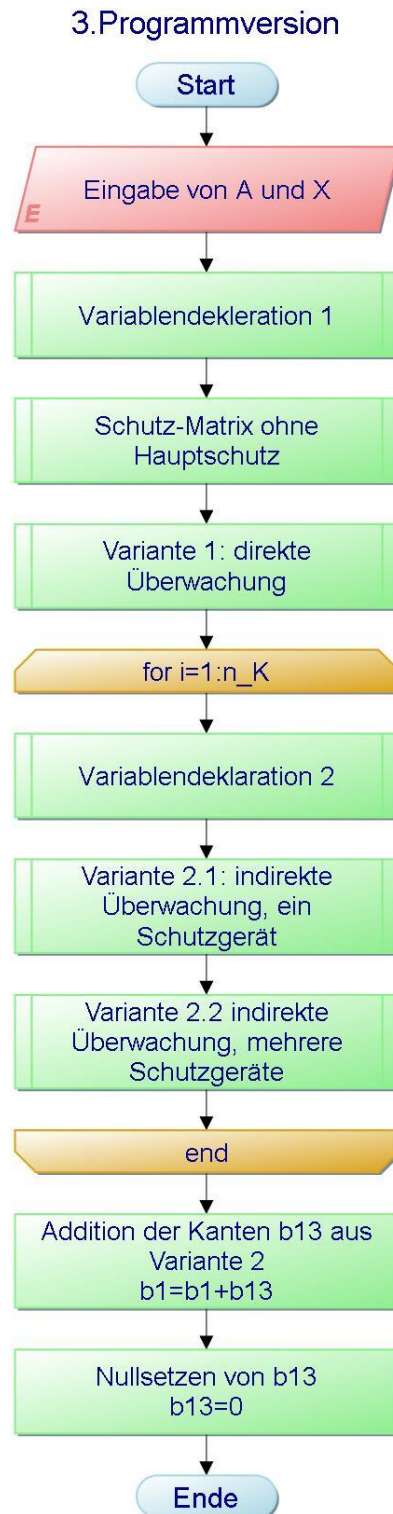
if x2>b12 && b13<a2

    A31=A3(:,a1)
    [Z3,S3]=find(A31)
    Z3'==S2
    z3=size(Z3,1)
    for k=1:z3
        c3=size(find(ans(:,k)),1)
        if c3>=1
            b13=b13+1
        end
    end
end
end
end

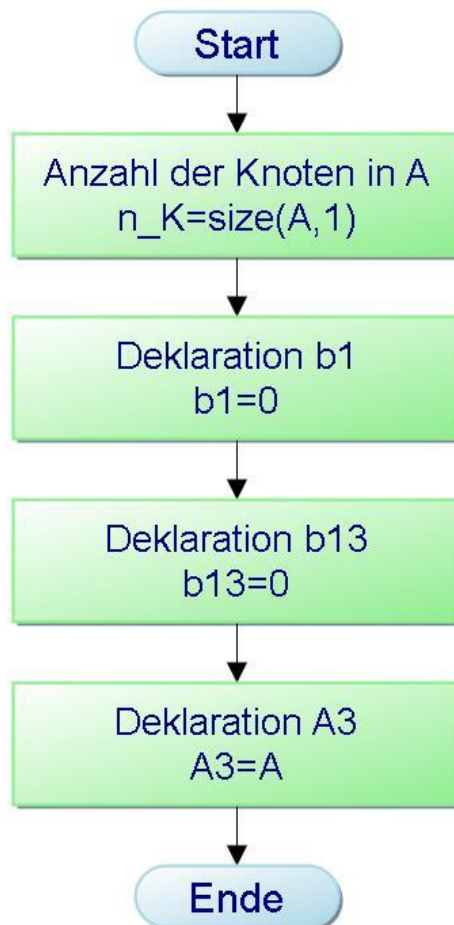
b1=b1+b13

b13=0
end
```

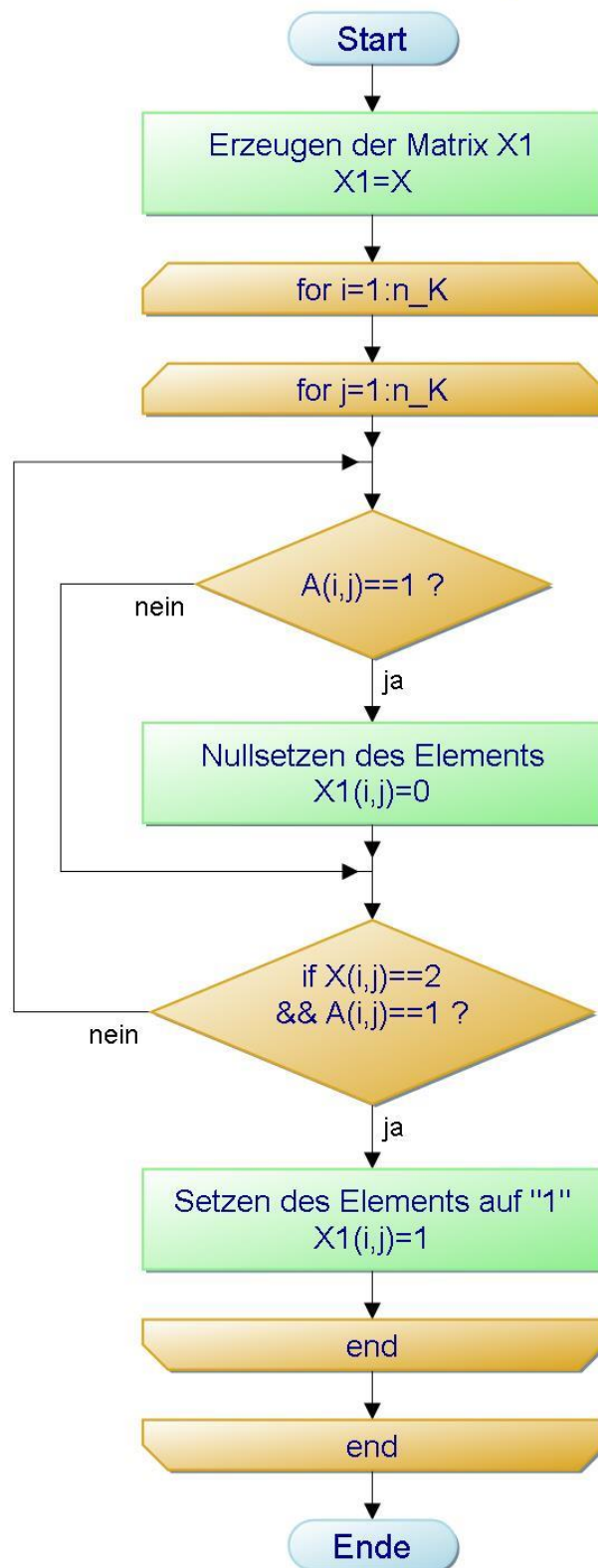
F Programmablaufplan: Bewertung Version 3



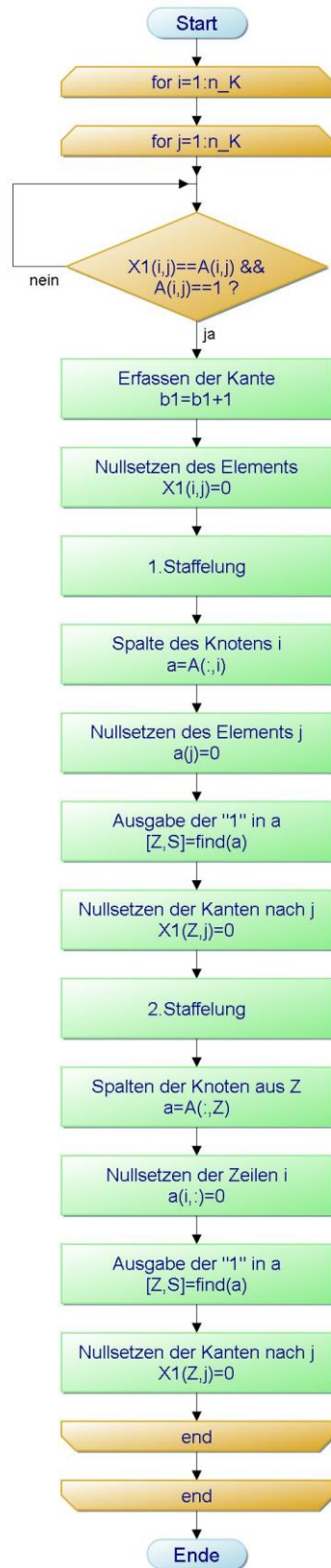
Variablendeklaration 1



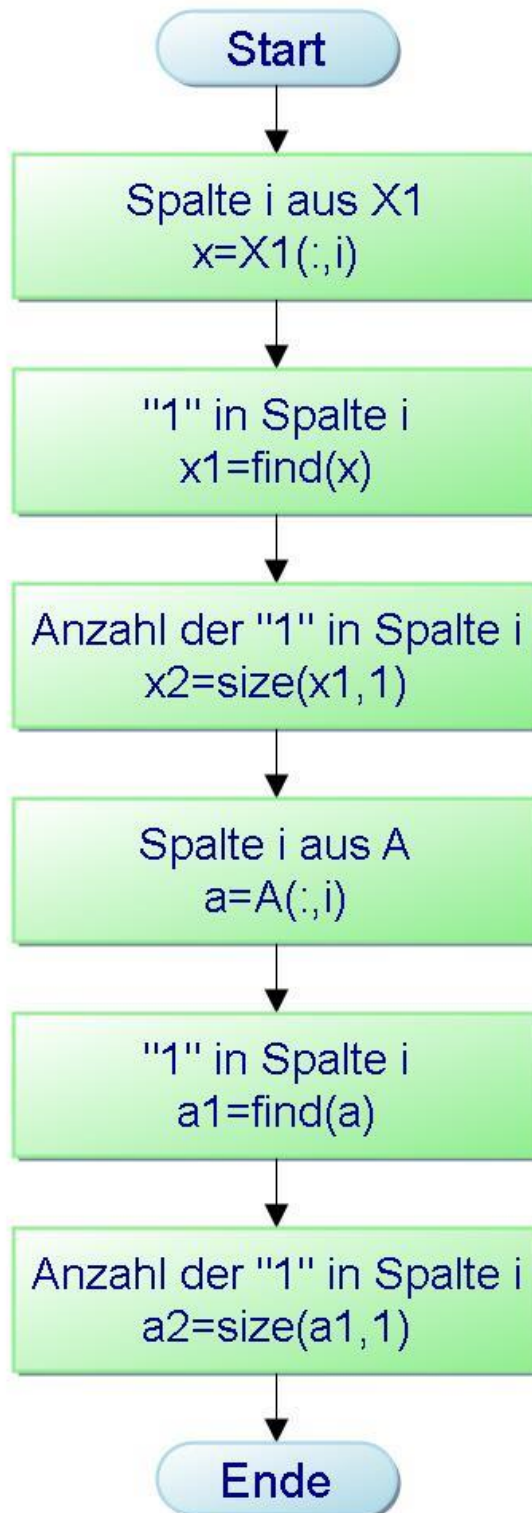
Schutz-Matrix ohne Hauptschutz



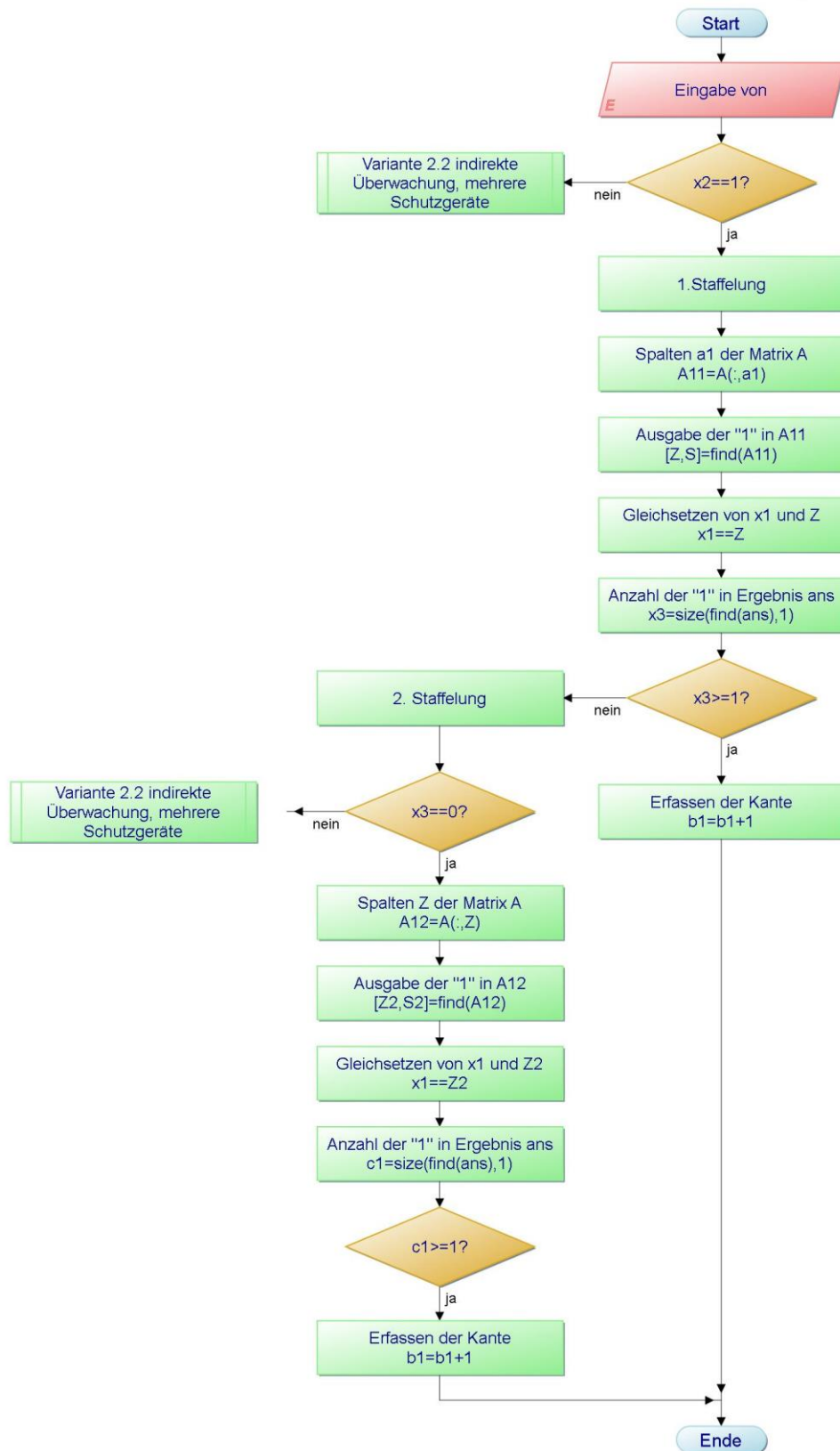
Variante 1: direkte Überwachung



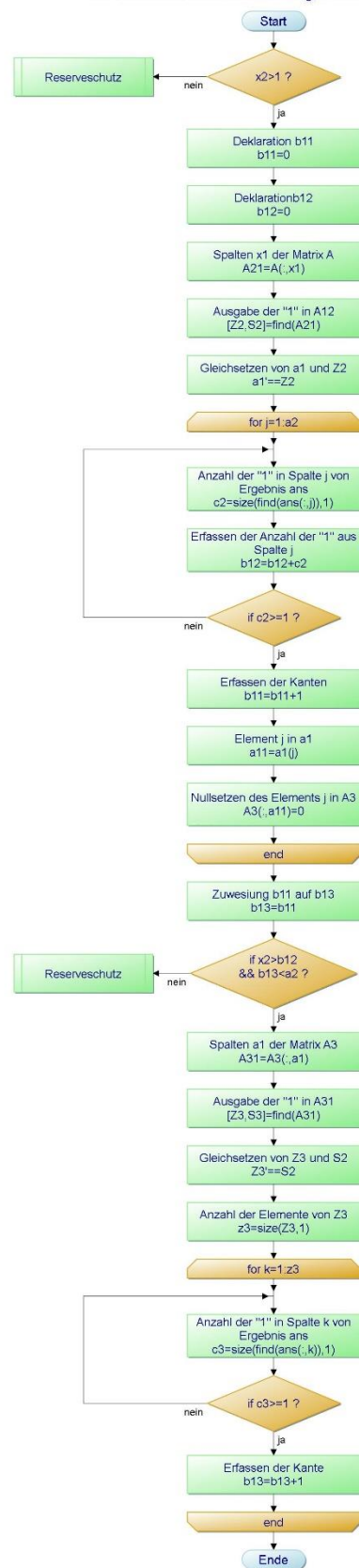
Variablendeklaration 2



Variante 2.1: indirekte Überwachung, ein Schutzgerät



Variante 2.2 indirekte Überwachung, mehrere Schutzgeräte



G Bewertung Version 4

```

%% Reserveschutz_Knoten_Terminal_2

clc
clear

%% Input_WSCC_9_Knoten_Testnetz

% Netzstruktur-Matrix, Knoten-Terminal-Matrix

B=[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0;
    1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0;
    0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1]

% Schutz-Matrix, Adjazenzmatrix zwischen den Terminals

X=[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ]

%% Variablendeklaration

n_K=size(X,1)
n_L=n_K/2

%% Hauptschutz

b11=0;
b12=0;

```

```
X1=triu(X)
X2=tril(X)

for i=1:n_K
    for j=1:n_K
        if X1(i,j)==1 && j==i+1
            b11=b11+1
            X1(i,j)=0
        end
        if X2(i,j)==1 && j==i-1
            b12=b12+1
            X2(i,j)=0
        end
    end
end

b=b11+b12
```

H Input-5-Stationen

```
%% Input-5-Stationen
```

```
% Netzstruktur-Matrix
```

```
A=[ 0 1 0 0 0;  
    1 0 1 0 0;  
    0 1 0 1 0;  
    0 0 1 0 1;  
    0 0 0 1 0 ]
```

```
% Schutz-Matrix
```

```
X=[ 0 1 0 0 0;  
    1 0 1 1 0;  
    0 1 0 1 1;  
    0 0 1 0 1;  
    1 0 0 1 0 ]
```

```
% Auslösezeiten-Matrix Hauptschutz
```

```
T1=[ 0 80 0 0 0;  
     80 0 90 0 0;  
     0 90 0 100 0;  
     0 0 100 0 110;  
     0 0 0 110 0 ]
```

```
% Auslösezeiten-Matrix Reserveschutz
```

```
T2=[ 0 0 0 0 0;  
     0 0 0 290 0;  
     0 0 0 0 350;  
     0 0 0 0 0;  
     450 0 0 0 0]
```

I Input-6-Stationen

```
%% Input-6-Stationen
```

```
% Netzstruktur-Matrix
```

```
A=[ 0 1 0 0 0 0;  
    1 0 1 0 0 0;  
    0 1 0 1 1 0;  
    0 0 1 0 0 0;  
    0 0 1 0 0 1;  
    0 0 0 0 1 0 ]
```

```
% Schutz-Matrix
```

```
X=[ 0 2 1 0 0 0;  
    2 0 2 0 0 0;  
    1 2 0 2 2 0;  
    0 0 2 0 0 0;  
    0 0 2 0 0 2;  
    1 0 0 0 2 0 ]
```

```
% Auslösezeiten-Matrix Hauptschutz
```

```
T1=[ 0 145 0 0 0 0;  
     90 0 10 0 0 0;  
     0 25 0 45 60 0;  
     0 0 80 0 0 0;  
     0 0 95 0 0 120;  
     0 0 0 0 10 0 ]
```

```
% Auslösezeiten-Matrix Reserveschutz
```

```
T2=[ 0 200 0 0 0 0;  
     320 0 390 0 0 0;  
     0 280 0 220 170 0;  
     0 0 330 0 0 0;  
     0 0 240 0 0 190;  
     0 0 0 0 200 0;]
```

J WSCC 9-Knoten-Testnetz

```
%% Input_WSCC_9_Knoten_Testnetz

% Netzstruktur-Matrix

A=[ 0 0 0 1 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 1 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 1;
    1 0 0 0 1 1 0 0 0;
    0 0 0 1 0 0 1 0 0;
    0 0 0 1 0 0 0 0 1;
    0 1 0 0 1 0 0 1 0;
    0 0 0 0 0 0 1 0 1;
    0 0 1 0 0 1 0 1 0 ]

% Schutz-Matrix

X=[ 0 0 0 2 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 2 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 2;
    2 0 0 0 2 2 0 0 1;
    0 0 0 2 0 0 2 0 0;
    0 0 0 2 0 0 0 0 2;
    0 2 0 1 2 0 0 2 1;
    0 0 0 0 0 0 2 0 2;
    0 0 2 1 0 2 1 2 0 ]

% Auslösezeiten-Matrix Hauptschutz

TH=zeros(9);

% Auslösezeiten-Matrix Reserveschutz

TR=zeros(9);
```

K WSCC 9-Knoten-Testnetz nach [22]

