

Implementierung von Algorithmen zur optimalen Verortung von Erdungsanlagen entlang induktiv beeinflusster Rohrleitungen

Diplomarbeit



Institut für Elektrische Anlagen
Technische Universität Graz

Vorgelegt von:
Christian Wahl

Betreuer:
Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Schmutzner
Dipl.-Ing. René Braunstein

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

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I

Telefon: (+43 316) 873 – 7551

Telefax: (+43 316) 873 – 7553

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

<http://www.tugraz.at>

Graz / Oktober– 2011



Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei:

Meinen Betreuern Dipl.-Ing. Dr. techn. Ernst Schmutzer und Dipl.-Ing. René Braunstein für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit und ihren konstruktiven Anregungen, um diese Arbeit zu verbessern.
Dipl.-Ing. René Braunstein für seine Unterstützung zu jeder Uhrzeit und für die Bereitstellung von Unterlagen für diese Arbeit.

Meiner Verlobten Sigrid für ihr offenes Ohr, Verständnis und Unterstützung während stressiger Zeiten im Studium, sowie ein Danke für die Momente, die ich mit ihr in ruhigen Zeiten verbringen konnte und kann.

Meinen Eltern, die mir immer beiseite stehen, wenn es finanziell oder persönlich nicht gut läuft, sowie ihr Interesse am Studium und daran, dass ich es auch beende.

Meinen Großeltern mit ihren finanziellen Gaben, um mir das Leben zu erleichtern.

Andreas, Rieke und Sigrid für ihre Unterstützung bei dieser Arbeit, damit sie eine ordentliche deutsche Grammatik bekommen hat.

Allen Freunden, die mich im Leben und Studium begleiten, mit denen ich viel Spaß haben kann und ich das kulturelle Wissen erlernt habe.

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am 24.10.2011

Vorname Nachname

GENDER

In der vorliegenden Arbeit werden personenbezogene Bezeichnungen häufig in männlicher Form angeführt, sie beziehen sich jedoch auf Frauen und Männer in gleicher Weise. Wird auf bestimmte Personen Bezug genommen, wird die zutreffende geschlechtsspezifische Form verwendet.

Kurzfassung

Durch die Bündelung von Verkehrs- und Energietrassen wird die Berechnung der induktiven Rohrleitungsbeeinflussung immer wichtiger, da sich Hochspannungsfreileitungen und elektrische Bahnanlagen nahe an isolierten metallischen Rohrleitungen befinden. Infolge der induktiven Beeinflussung können Spannungen an den Rohrleitungen auftreten, welche eine Gefahr für Mensch und Anlagenteile darstellen können. Ein weiteres aktuelles Thema stellt auch die Wechselstromkorrosion dar, welche ebenfalls durch induktive Beeinflussung ausgelöst wird und im fortgeschrittenen Stadium zusätzlich eine Gefahr für die Umwelt bedeutet. Um diesen Gefahren entgegenzuwirken, werden Wechselstromerdungsanlagen verwendet, welche die maximalen Beeinflussungsspannungen an den Rohrleitungen auf ein ungefährliches Niveau senken. Die richtige Verortung, dazu zählen Position und Widerstandswert der Erdungsanlage, ist sehr wichtig, da nur bei geeigneter Wahl der Parameter die höchste Beeinflussungsspannung reduziert werden kann. In modernen Zeiten, in denen genügend Rechenkapazitäten zur Verfügung stehen, kann die Berechnung der Verortung von Algorithmen übernommen werden, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Dabei wird mit einer in Matlab geschriebenen Berechnungssoftware eine Optimierung durchgeführt, um zu untersuchen, welcher Algorithmus in welcher Situation das beste Ergebnis liefert. Als Kriterium gilt nicht nur die Reduzierung der maximalen Spannung, sondern auch eine technisch-wirtschaftliche Optimierung, um die Kosten für die allenfalls erforderlichen Erdungsanlagen so gering wie möglich zu halten.

Abstract

The calculation of the inductive interference on pipelines has become increasingly important. This is due to the increasing overlap of traffic and energy routes, where high voltage overhead lines and electric railways are closely located to isolated metallic pipelines. The inductive influence of these interfering lines leads to induced voltages along interfered pipelines, which bear dangers for humans and as well as for pipeline system components. In addition to that, the inductive influence may cause alternating current corrosion, which may cause additional threat for the environment.

To lower these dangers, alternating current earthing systems are employed, which decrease the maximum interference voltage along these pipelines to a safe border. The correct placement of these systems plays a crucial role. This includes finding the right position as well as the resistance values for the earthing systems, because only a correct choice of these parameters will lead to a decrease of the maximum interference voltage.

In our modern times, where there exists enough calculating capacity, the optimum placement can be calculated with the help of algorithms. This thesis presents a Matlab-based software, which, through optimization, identifies which algorithm produces the best result for given situations. This optimization does not only focus on decreasing the maximum interference voltage, it also optimizes the cost-effectiveness in order to reduce the costs for mitigating earthing systems to a minimum.

INHALTSVERZEICHNIS

1	KURZFASSUNG	1
1.1.	Ziel	1
1.2.	Methode	1
1.3.	Ergebnisse	1
1.4.	Schlussfolgerung und Ausblick.....	1
2	EINLEITUNG	2
2.1.	Einführung.....	2
2.2.	Problemstellung.....	3
2.3.	Zielsetzung	4
2.4.	Kurzbeschreibung der Methode.....	4
3	ROHRLEITUNGSBEEINFLUSSUNG	5
3.1.	Allgemeines.....	5
3.2.	Wechselspannungsbeeinflussungsarten.....	5
3.2.1.	Ohmsche Beeinflussung.....	5
3.2.2.	Kapazitive Beeinflussung	7
3.2.3.	Induktive Beeinflussung.....	8
3.3.	Elemente zur Rohrleitungsspannungsreduktion	11
3.3.1.	Wechselstromerdungsanlagen	11
3.3.2.	Isolierkupplung	16
3.4.	Wechselstromkorrosion	17
3.5.	Richtlinien	19
4	EINFÜHRUNG IN DIE ALGORITHMEN	21
4.1.	Grundlagen.....	21
4.2.	Eigenschaften eines Algorithmus.....	22
4.3.	Effizienz von Algorithmen	23
4.3.1.	Komplexitätstheorie und Anforderungen	23
4.3.2.	Komplexitätsklassen.....	23
4.3.3.	Effizienz	25
4.3.4.	Schlechtester und mittlerer Fall von Laufzeiten	26
4.3.5.	Wachstumsgrad.....	26
4.3.6.	Laufzeiten im Zusammenhang mit asymptotischer Notation	27
4.4.	Parallelität.....	28
4.5.	Algorithmen als Technologie	29
5	BERECHNUNG UND METHODIK	30
5.1.	Berechnung der induzierten Spannungen	30
5.2.	Problemstellung.....	32
5.3.	Verwendete Arbeitsutensilien, Messung der Laufzeiten	34
5.4.	Kostenbewertung von Wechselstromerdungsanlagen	35
5.5.	Verwendete Programmoberfläche	36
5.6.	Optimierungsbedingungen und Analysekrterien.....	38
5.7.	Eine kurze Einführung in Flussdiagramme	39
6	BESCHREIBUNG DER VERWENDETEN ALGORITHMEN	40

6.1.	Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus (VSOA)	40
6.1.1.	Einführung	40
6.1.2.	Flussdiagramm – Variation der Erdungsanlagen	41
6.1.3.	Beschreibung und Flussdiagramm des VSOAs	46
6.2.	Randomisierter Algorithmus	51
6.2.1.	Einführung in randomisierte Algorithmen	51
6.2.1.1.	Ein demonstrierendes Beispiel	51
6.2.1.2.	Grundlagen	53
6.2.1.3.	Typen von Random-Algorithmen	53
6.2.1.4.	Mittlere versus erwartete Laufzeit	53
6.2.1.5.	Fehlerwahrscheinlichkeit.....	54
6.2.2.	Monte-Carlo- versus Las-Vegas-Algorithmus	55
6.2.2.1.	Monte-Carlo-Algorithmus (MCA).....	55
6.2.2.2.	Las-Vegas-Algorithmus (LVA).....	55
6.2.2.3.	Vergleich und Zusammenhang zwischen MCA und LVA	56
6.2.3.	Beschreibung und Flussdiagramm des Las-Vegas-Algorithmus	57
6.3.	Experten-Algorithmus	62
6.3.1.	Entwicklung	62
6.3.2.	Beschreibung und Flussdiagramm des Experten-Algorithmus	63
7	VERGLEICH DER VERWENDETEN ALGORITHMEN	69
7.1.	Verwendung der Widerstandsreihe	71
7.1.1.	Analyse der berechneten Lösungen für das Beispiel.....	71
7.1.2.	Kostenanalyse der Lösung bei der jeweiligen Grenzspannung	76
7.1.3.	Laufzeitanalyse.....	78
7.2.	Verwendung des fixen Widerstandswertes von 1 Ω	82
7.2.1.	Analyse der berechneten Lösungen für das Beispiel.....	82
7.2.2.	Kostenanalyse der Lösung bei der jeweiligen Grenzspannung	86
7.2.3.	Laufzeitanalyse.....	88
7.3.	Vergleich der zwei Widerstands-Berechnungsmethoden	91
7.4.	Analyse für die Richtlinien TE30 und CEN/TS 15280	92
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	96
8.1.	Zusammenfassung	96
8.2.	Ausblick.....	99
9	VERZEICHNISSE	100
9.1.	Literatur und Quellen.....	100
9.2.	Abbildungen	103
9.3.	Tabellen	106
ANHANG A	WIDERSTANDSREIHE	109
ANHANG B	FIXER WIDERSTANDSWERT VON 1 Ω	114

1 KURZFASSUNG

1.1. Ziel

In dieser Diplomarbeit werden Algorithmen untersucht, welche eine Reduzierung der maximalen Beeinflussungsspannung an isolierten metallischen Rohrleitungen durch induktive Beeinflussung, verursacht von Hochspannungsleitungen oder elektrischen Bahnanlagen, ermöglichen sollen. Dazu werden Wechselstromerdungsanlagen verwendet, welche optimal verortet werden, d.h. sowohl die Position als auch der Widerstandswert der Erdungsanlagen sollen unter Berücksichtigung der Kosten für Erdungsanlagen richtig berechnet werden.

1.2. Methode

Mit einer in Matlab geschriebener grafischen Oberfläche können unterschiedliche Algorithmen sowie Parameter für die Berechnung gewählt werden und damit unterschiedliche Beispiele berechnet werden. Es werden zueinander unterschiedliche Algorithmen verwendet, um möglichst optimale Ergebnisse für gleiche Grenzen zu erhalten.

1.3. Ergebnisse

Jeder Algorithmus hat seinen speziellen Fachbereich, in dem er effizient eingesetzt werden kann. Bei einer geringen Anzahl von Erdungsanlagen führt der vollständige Such- und Optimieralgorithmus häufig zum besten Ergebnis bei akzeptablen Laufzeiten. Im Gegensatz dazu liefert der Experten-Algorithmus befriedigende Resultate bei einer schnellen, konstanten Laufzeit. Da der Las-Vegas-Algorithmus auf einem Zufallsprinzip basiert, muss dieser mehrmalig ausgeführt werden, um annähernd optimale Ergebnisse zu bekommen.

1.4. Schlussfolgerung und Ausblick

Die Auswertung der Berechnungsalgorithmen zeigt sehr unterschiedliche Ergebnisse. Die führen zur Erkenntnis, dass kein Algorithmus optimal für alle Aufgaben ist. Meistens ergeben sich spezielle Aufgabenstellungen, in denen ein Algorithmus bei der Berechnung glänzt, sei es wegen der Laufzeit oder der Kostenoptimierung. Zwecks besserer Resultate können die Algorithmen weiter optimiert werden. Dem steht jedoch ein aufwendigerer Programmcode und damit längere Rechenzeiten gegenüber.

2 EINLEITUNG

2.1. Einführung

Durch die Bündelung von Verkehrs- und Energietrassen wird die Berechnung der induktiven Rohrleitungsbeeinflussung (Kapitel 3.2.3) immer wichtiger, da sich durch diese Bündelung immer öfters Hochspannungsfreileitungen bzw. elektrische Bahnanlagen (= beeinflussende Systeme) nahe an metallischen Rohrleitungen (= beeinflusste Systeme) befinden [1].

In diesen Hochspannungsleitungen und elektrischen Bahnanlagen wird sowohl im Normalbetrieb als auch im Fehlerfall (Kurzschluss) ein Strom fließen. Dieser erzeugt ein magnetisches Feld, welches wiederum eine Spannung in isolierte metallische Rohrleitungen induziert. Wenn die beeinflussenden und beeinflussten Systeme eine längere Parallelführung haben, wird dementsprechend eine hohe Spannung induziert, welche u.a. vom maximalen Strom im beeinflussendem System abhängig ist (Kapitel 5.1) [1]. Diese Spannungen dürfen vorgegebene Grenzwerte (Kapitel 3.5) nicht überschreiten, da ansonsten Maßnahmen durchgeführt werden müssen, um die maximale Beeinflussungsspannung zu reduzieren. Diese bestehen aus Wechselstromerdungsanlagen (Erder) oder Isoliereinrichtungen, damit die Spannung zulässige Werte in Bezug auf die Berührungsspannung und Wechselstromkorrosion erreicht sowie in weiterer Folge auch die Schädigung von Einrichtungen verhindert wird.

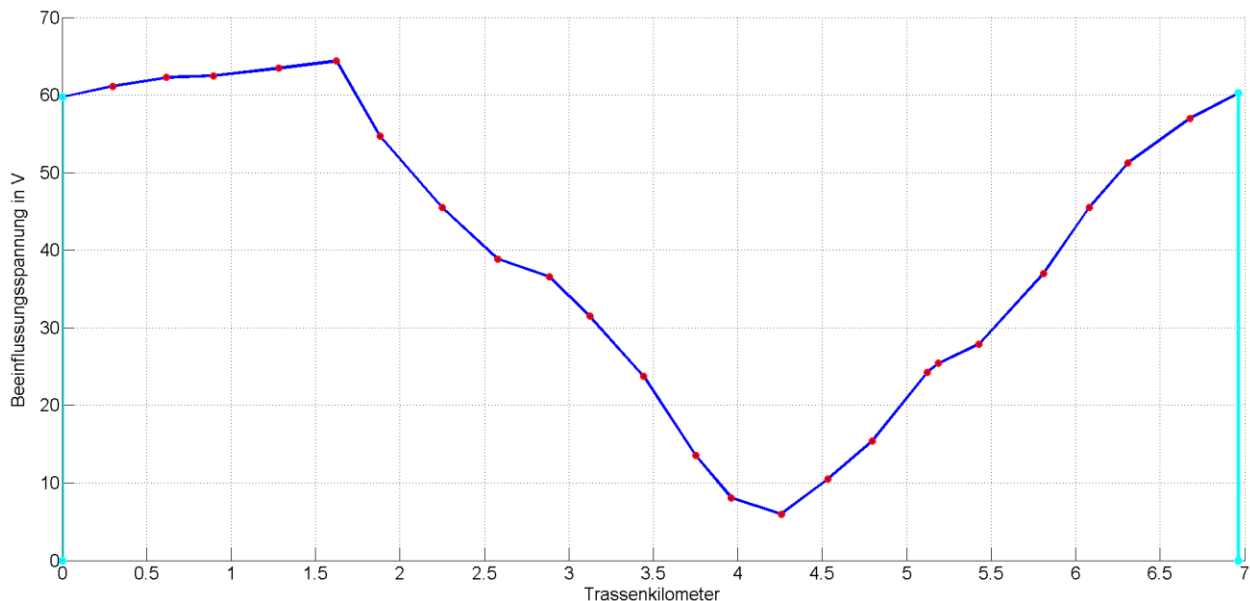


Abbildung 2-1: Spannungsverlauf entlang einer induktiv beeinflussten Rohrleitung

Abbildung 2-1 zeigt beispielhaft den Spannungsverlauf entlang einer Rohrleitung verursacht durch ein beeinflussendes System. Je nach Stärke der magnetischen Kopplung weist die Rohrleitung

unterschiedlich hohe Spannungen entlang ihres Verlaufes auf. In diesem Beispiel liegt die Spannung unter der im Normalbetrieb zulässigen Grenzspannung von 65 Volt (Kapitel 3.5). Die Spannung würde aber ohne geeignete Maßnahmen wesentlich höher liegen, weswegen am Anfang und Ende der Rohrleitung eine Erdungsanlage verwendet wird.

2.2. Problemstellung

Erdungsanlagen sind eine Maßnahme, um das Sollziel der erforderlichen Spannung zu erreichen und können sowohl vom Widerstandswert als auch von der Position entlang der Rohrleitung variiert werden. Damit sie eine effektive Maßnahme sind, ist eine richtige Verortung ein Muss. Dazu werden Berechnungssimulationen in Matlab durchgeführt, wobei bisher dafür ein anderes Matlab-Programm verwendet wurde, in dem die Erdungsanlagen sowohl vom Widerstandswert als auch von der Position manuell hinzugefügt werden mussten.

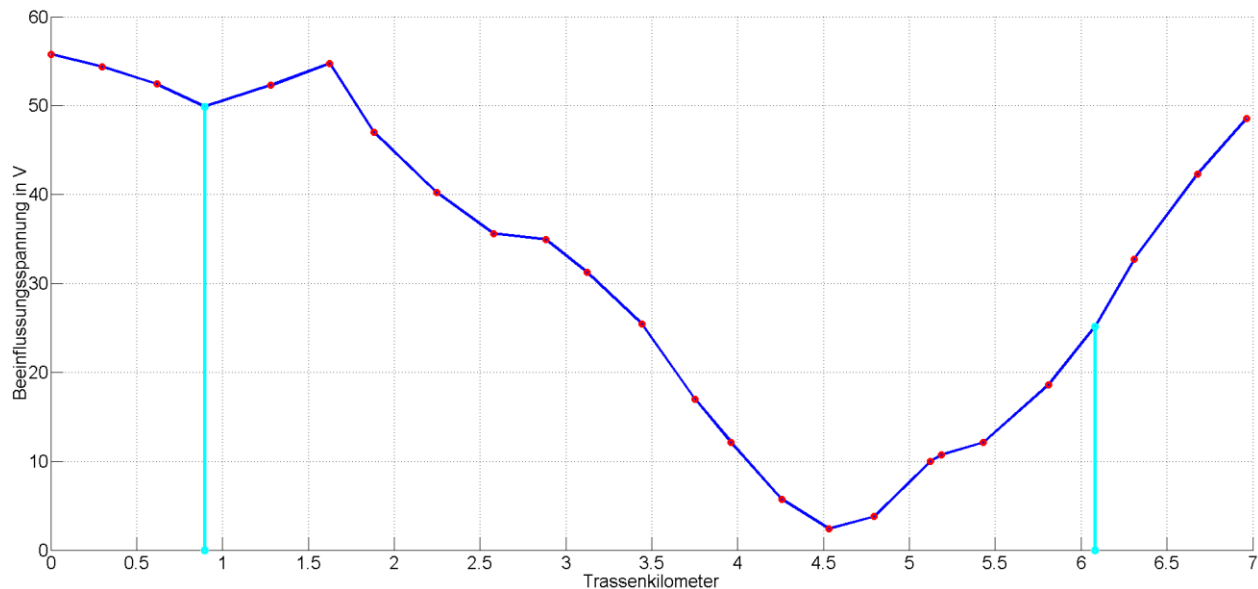


Abbildung 2-2: Spannungsverlauf entlang einer induktiv beeinflussten Rohrleitung alternative Lösung, manuell erstellt

Abbildung 2-2 zeigt eine andere, mögliche Lösung. Es gibt verschiedene Wege, um das Problem zu lösen. Da das manuelle Herausfinden der optimalen Lösung zeitaufwändig und hinsichtlich der Personalressourcen kostenintensiv ist, ist es heutzutage naheliegend, die Berechnungen auf leistungsstarke Computer auszulagern. Diese können über Algorithmen eine optimale Lösung für das Problem wesentlich schneller berechnen. Dadurch haben Personen mit geringem Expertenwissen ebenfalls die Möglichkeit, Aufgabenstellungen selbstständig zu lösen.

2.3. Zielsetzung

Wie es in der Praxis oft vorkommt, ist eine optimale Berechnung von Position und Widerstandswert für Erdungsanlagen entweder nur zu einem gewissen Maße möglich oder es muss eine lange Rechenzeit in Kauf genommen werden. Jeder Algorithmus hat dabei seine eigene Charakteristik. Entweder liefert ein Algorithmus bei enormer Rechenzeit das beste Ergebnis, oder er erreicht in kürzerer Zeit ein suboptimales Ergebnis. Erdungsanlagen müssen nicht nur hinsichtlich der induzierten Spannungen ungefährliche Werte aufweisen, sie sind auch mit hohen Kosten verbunden. Die Kosten für eine Anlage hängen sowohl vom spezifischen Erdwiderstand als auch vom Widerstandswert des umgebenden Erdreiches ab, daher müssen im Idealfall so wenige potenzialreduzierende Erdungsanlagen wie möglich verwendet werden. Die zu erreichenden Ziele sind damit klar definiert: Die Verortung von Erdungsanlagen im Kontext einer technisch-wirtschaftliche Optimierung.

Da es jedoch nicht immer die Möglichkeit gibt, den Erder am optimalen Standort zu errichten, soll es auch die Möglichkeit geben, gewisse Streckenteile bei der Berechnungssimulation nicht zu berücksichtigen. Um das bereits am Institut für Elektrische Anlagen vorhandene Expertenwissen [2] einfließen lassen zu können, wird auch ein Algorithmus entwickelt, welcher diese Vorgehensweise berücksichtigt (Kapitel 6.3).

Das Ziel ist es, die verwendeten Algorithmen zu analysieren, ihre Vor- und Nachteile aufzulisten und ihre Verwendbarkeit bei unterschiedlichen Problemen zu überprüfen. Dabei soll die Frage beantwortet werden, welcher Algorithmus bei bestimmten realistischen Aufgabenstellungen am Besten geeignet ist.

2.4. Kurzbeschreibung der Methode

In dieser Arbeit werden praxisrelevante Spannungsverläufe entlang induktiv beeinflusster Rohrleitungen mit unterschiedlichen Erdungsanlagenkonfigurationen untersucht, diese werden je nach Algorithmus unterschiedlich generiert und anschließend berechnet. Da die maximale Grenzspannung vorgegeben werden kann, werden diverse Konfigurationen getestet, bis die Spannung unter diesem eingegebenen Wert liegt. Je nach Algorithmus werden mehrere dieser gültigen Datensätze zwischengespeichert und anschließend folgt eine technisch-wirtschaftliche Optimierung, Hierzu wird von diesem Datensatz die Erderkonfiguration mit den geringsten Kosten herausgesucht, wobei die Laufzeit mitprotokolliert und nach mehreren Durchläufen gemittelt wird.

Als Software wird ein selbstgeschriebenes MATLAB-Programm mit graphischer Oberfläche verwendet (Kapitel 5.4).

3 ROHRLEITUNGSBEEINFLUSSUNG

3.1. Allgemeines

Bei der Rohrleitungsbeeinflussung gibt es eine Vielzahl von Eingabeparametern. Zur gültigen Bestimmung müssen einschlägige Bestimmungen und Vorschriften eingehalten werden, diese findet man in den in Österreich gültigen Richtlinien Technische Empfehlung 30 [3] und CEN/TS 15280 [4] (siehe Kapitel 3.5). Zur Berechnung der Impedanzen, Spannungen, etc. werden einschlägige, in der Fachliteratur angegebene Verfahren, die dem Stand der Technik entsprechen, herangezogen [2].

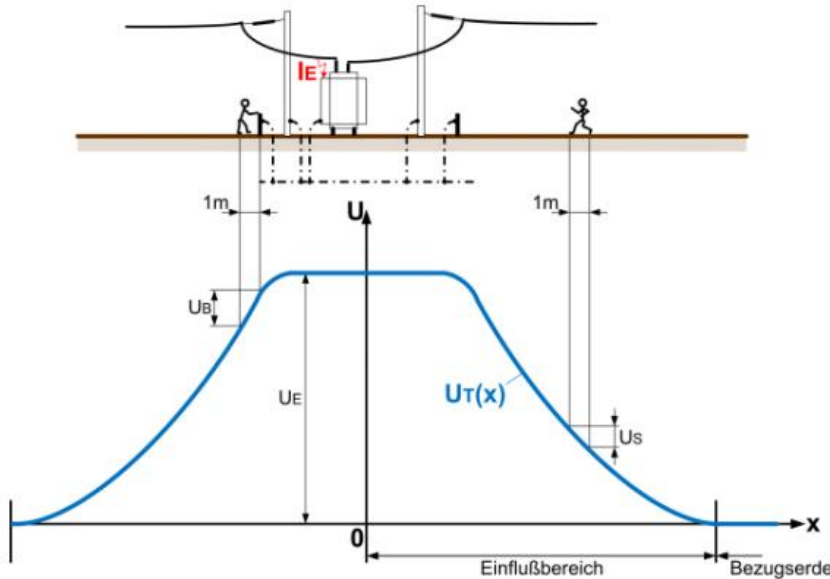
Bei der Wechselspannungsbeeinflussung wird zwischen Langzeit und Kurzzeitbeeinflussung unterschieden. Unter **Langzeitbeeinflussung** ist eine dauerhafte Beeinflussung gemeint, welche im Normalbetrieb einer Hochspannungsleitung oder einer elektrischen Bahnanlage entsteht. Unter **Kurzzeitbeeinflussung** versteht man die seltene Einwirkungen im Fehlerfall wie z.B. bei Kurzschlüssen, die in der Regel rasch selbsttätig abgeschaltet werden. Die Dauer der Kurzzeitbeeinflussung soll unter 0,5 Sekunden, möglichst aber unter 0,2 Sekunden liegen [5].

3.2. Wechselspannungsbeeinflussungsarten

Bei der Wechselspannungsbeeinflussung unterscheidet man drei Beeinflussungsarten: ohmsche, kapazitive und induktive Beeinflussung. Diese werden in den nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben. Bei der Bewertung der Wechselspannungsbeeinflussung wird immer von einem Worst-Case-Szenario ausgegangen (z.B. maximale thermische Ströme) [6].

3.2.1. Ohmsche Beeinflussung

Für die Ohmsche Beeinflussung stellt der Erdboden das Kopplungsmedium dar. Die elektrischen Ströme können über Erdungsanlagen nach Erde abgeleitet werden. Durch diese Ströme bildet sich im Bereich der Eintrittsstelle (Erdungsanlage oder Fehlerstelle) ein Anstieg des lokalen Erdpotentials gegenüber der Bezugs Erde (ferne Erde = Null-Potenzial) aus. Der entstehende Spannungstrichter hat sein Maximum an der Eintrittsstelle und nimmt mit zunehmender Entfernung von der Anlage ab. Liegt nun eine fremde Einrichtung innerhalb des Spannungstrichters, nimmt diese ein bestimmtes Potential an, verschleppt dieses Potential außerhalb des Trichters und erzeugt dort einen Potentialunterschied, welcher unter Umständen gefährlich für Mensch und Anlagenteile werden könnte [7] [8] [9].



U_S ... Schrittspannung
 U_B ... Berührungsspannung
 U_E ... Erdungsspannung

Abbildung: 3-1: Schritt- und Berührungsspannungen [7]

Erdungsspannung \underline{U}_E [7]:

$$\underline{U}_E = \underline{Z}_F \cdot \underline{I}_E$$

Die Erdungsimpedanz \underline{Z}_E einer Erdungsanlage ergibt sich durch die konstruktiven Gegebenheiten (z.B. Material, Art und geometrische Abmessungen der Anlage) und den geologischen Beschaffenheiten des Erdbodens (spezifischer Erdwiderstand). Der Strom \underline{I}_E über die Erdungsanlage muss nach unterschiedlichen Kriterien (z.B. Freileitung, Kabel, Betriebszustand) bestimmt werden [8].

Die Potentialunterschiede (z.B. Erdungs-, Schritt- und besonders Berührungsspannungen) dürfen dabei die Grenzen der Gefährdung nicht überschreiten und müssen untersucht werden. Da aber der höchste Teil des Spannungstrichters nur eine kleine geografische Ausbreitung aufweist, welcher besonders im Fehlerfall auftritt, ist diese Art der Beeinflussung dann zu beachten, wenn sich beeinflussende und beeinflusste Leitung geografisch auf engem Raum befinden [7] [8]. Folgendes Beispiel zeigt einen solchen Fehler:

In der folgenden Abbildung 3-2 nähert sich die Rohrleitung an das beeinflussende System. Hier wird angenommen, dass ein Fehlstrom über das Erdseil zur Mastererdungsanlage in den Boden abfließt. Durch die trichterförmige Ausbreitung der Spannung an der Fehlerstelle, wird die die Isolationsschicht der Rohrleitung abhängig von der Entfernung einem elektrischen Potential ausgesetzt. Ist das elektrische Potenzial höher als die Durchschlagfestigkeit der Rohrleitungsisolierung, kann es zu einem Fehler in der Isolationsschicht und dadurch zu einer eingekoppelten Störung kommen [7].

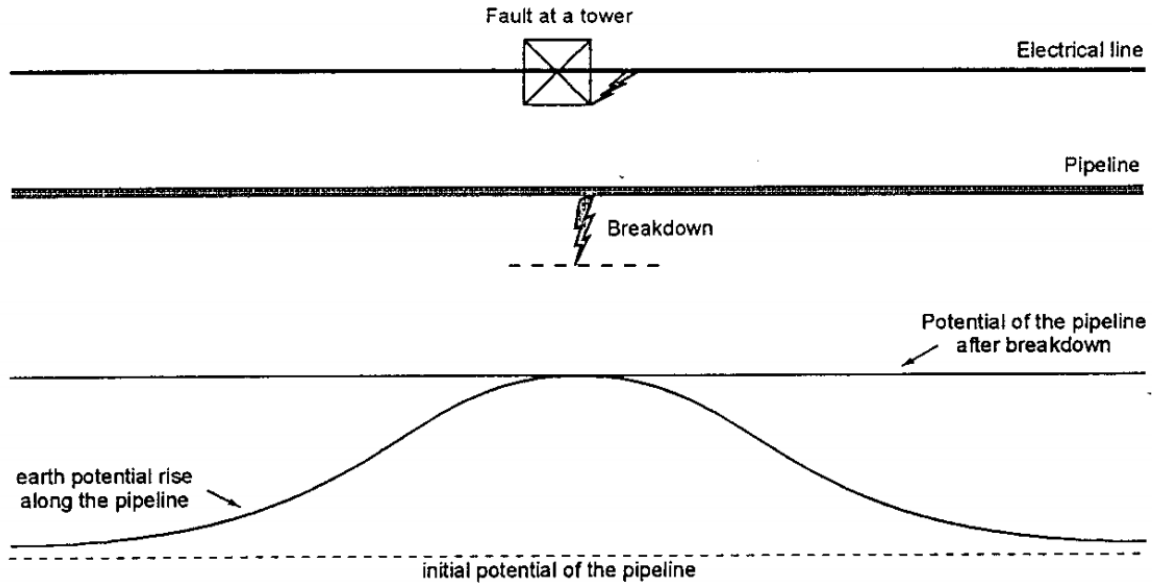


Abbildung 3-2: Ohmsche Beeinflussung beim Versagen der Isolationschicht [7]

3.2.2. Kapazitive Beeinflussung

Kapazitive Beeinflussungen treten dann auf, wenn zwischen beeinflussendem und beeinflusstem System eine Kopplung über das elektrische Feld besteht. In der Regel ist das beeinflussende System eine Starkstromfreileitung, welche sich dem beeinflussten System nähert und über eine längere Strecke parallel verläuft.

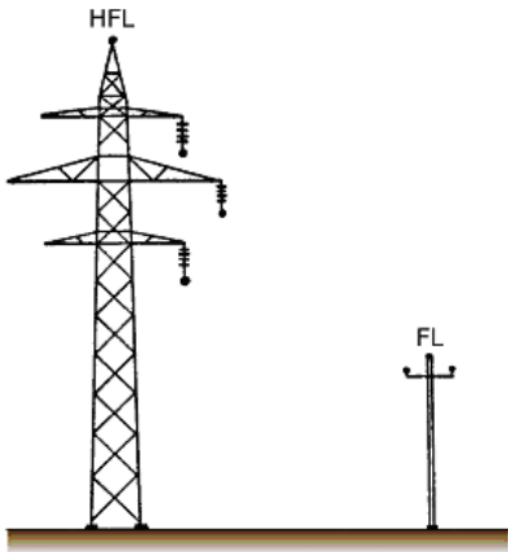


Abbildung 3-3: Kapazitive Beeinflussung einer Fernmeldeleitung durch eine Hochspannungsfreileitung [8]

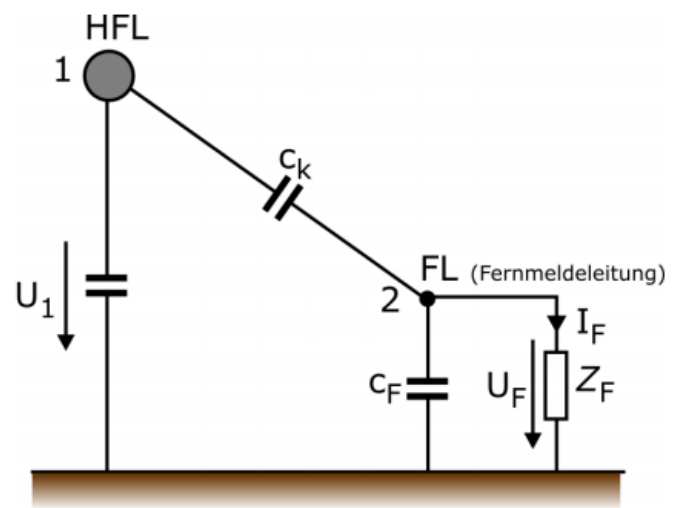


Abbildung 3-4: Beeinflussungsmodell der kapazitive Beeinflussung [8]

Die Abbildung 3-4 kann als Ersatzschaltbild für die kapazitive Beeinflussung herangezogen werden. Die beeinflussende Leitung (**HFL**) mit der Spannung \underline{U}_1 überträgt über eine gemeinsame Kopplungskapazität c_K eine Beeinflussungsspannung \underline{U}_F auf die benachbarte beeinflusste Leitung (**FL**). Über die angeschlossene Impedanz Z_F (Mensch, Gerät) fließt dann der influenzierte Strom I_F in Richtung Erde ab. Die Kapazitätsbelege sind abhängig von der geometrischen Konfiguration und bilden ein Kapazitätsverhältnis zwischen diesen zwei Leitern, welches mit der influenzierenden Spannung \underline{U}_1 eine kapazitive Beeinflussungsspannung \underline{U}_F ergibt. Der influenzierte Strom ist abhängig von der Koppelkapazität, der Systemfrequenz, der Spannung und der Ausdehnung der Leitungsanlage [8].

Influenzierte Spannung [7]

$$\underline{U}_F = \frac{c_K \cdot \ell}{c_F \cdot \ell_F} \cdot \underline{U}_1$$

Influenzierter Ladestrom [7]

$$\underline{I}_F = j \cdot \omega \cdot c_K \cdot \ell \cdot \underline{U}_1$$

\underline{U}_1	influenzierende Spannung des Leiters 1 (HFL)
c_K	Belag der Koppelkapazität
ℓ	Länge der Näherung
c_F	Erdkapazitätsbelag des Leiters 2 (FL)
ℓ_F	Länge der gesamten Fernmeldeleitung (FL)
\underline{U}_F	influenzierte Spannung des Leiters 2 bei $z_F = \infty$
\underline{I}_F	influenzierter Ladestrom bei $z_F = 0$
z_F	Fehler-Impedanz, an Erde angeschlossen
ω	Systemfrequenz

Im Fall von Rohrleitungen befinden sich diese metallischen Leiter unter der Erde, sodass die kapazitive Kopplung zu vernachlässigen ist. Folgende Fälle sind jedoch zu beachten [3]:

- Während der Bauarbeiten, wenn die Rohrleitung isoliert auf der Erde liegt.
- Wenn die verschweißte Rohrleitung nicht unterirdisch geführt wird, sondern z.B. oberirdisch auf Hölzern gelagert wird.

3.2.3. Induktive Beeinflussung

Induktive Kopplungen treten auf, wenn zwischen einer beeinflussenden und einer beeinflussten Leitung ein magnetisches Feld besteht. Zur induktiven Beeinflussung ist eine Näherung dieser zwei Leitungen erforderlich und über eine längere Strecke hat ein Parallellauf zu erfolgen damit gefährliche Spannungen für Mensch und Gerät entstehen können [1].

Ein vereinfachtes Modell für die induktive Beeinflussung wird in Abbildung 3-5 dargestellt. Der über Erde geschlossene Stromkreis der beeinflussenden Leitung führt einen Strom \underline{I} . Durch das magnetische Feld wird eine Spannung in die beeinflussende Leitung induziert, sodass auf einer Seite über die ferne Erde die induzierte Koppelspannung \underline{U}_i abgegriffen werden kann. Für die magnetische Kopplung wird ein spezifischer Koppelimpedanzbelag z_g je Längeneinheit angenommen [8].

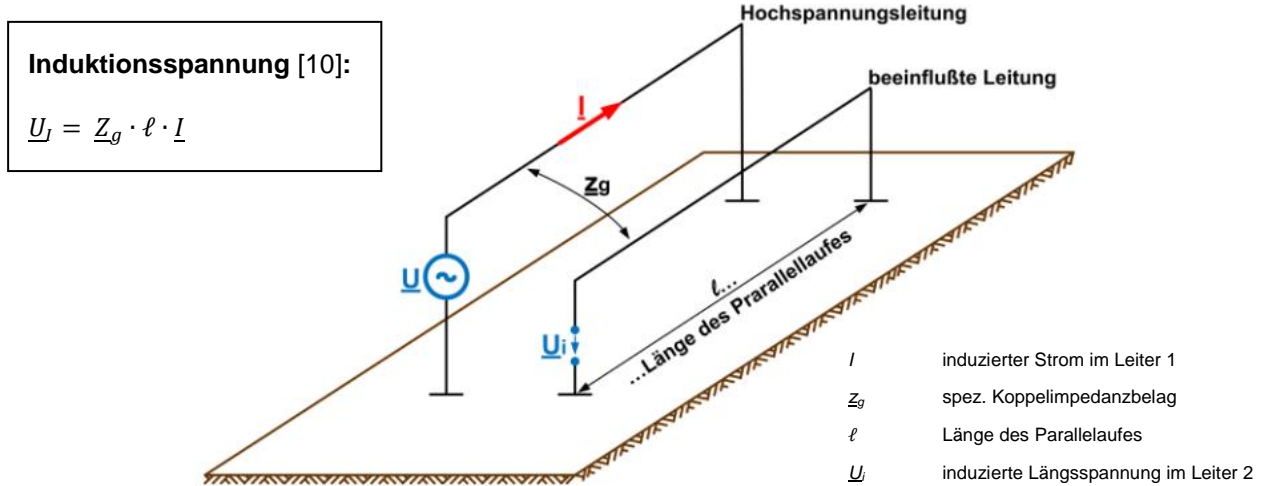


Abbildung 3-5: Einfaches Beeinflussungsmodell der induktiven Beeinflussung [10], geändert

In der Praxis ist dieser einfache Beeinflussungsfall normalerweise nicht vorhanden, sondern es müssen wesentlich komplexere Verhältnisse berücksichtigt werden. Dazu zählen auf der **beeinflussenden Seite** mehrere Phasenleiter als Einfach- oder Mehrfachleitungen sowie Erdseile der andere Kompensationsleiter- Auf der **beeinflussten Seite** können ebenfalls mehrere Rohrleitungen vorhanden sein.

In Abbildung 3-6 ist ein System mit zwei beeinflussten Systemen zu sehen. Diese reduzierende Wirkung parallel verlaufender Rohrleitungen kann vereinfacht mit Hilfe eines Rohrleitungsreduktionsfaktor r_R erfolgen [11].

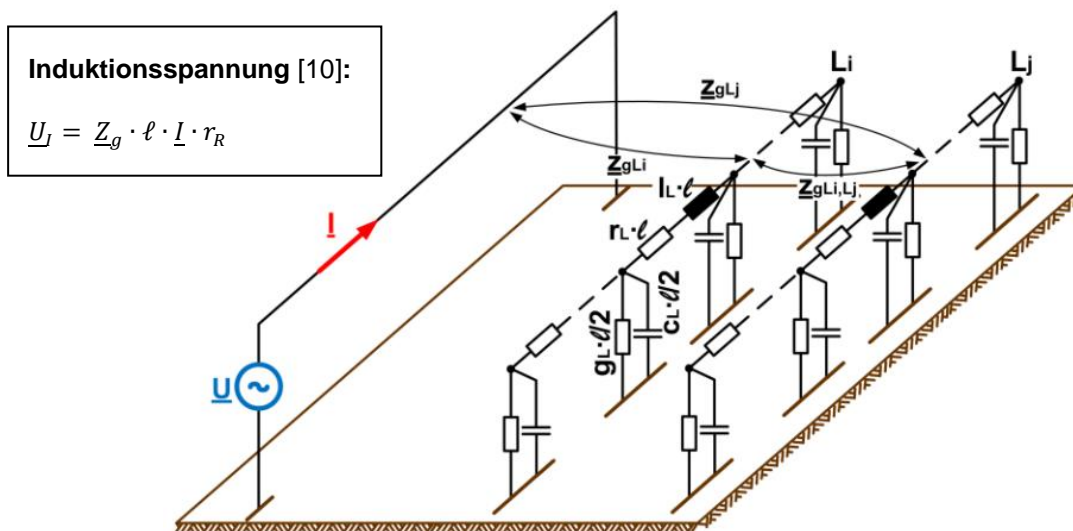


Abbildung 3-6: Beeinflussungsmodell der induktiven Beeinflussung mit zwei Rohrleitungen [10], geändert

Die Abbildung 3-7 stellt einen komplexeren Fall dar. Die einzelnen Leitungen werden als System von Linienleitern dargestellt, die zueinander parallel sind. Die Phasenleiterströme I_p werden vom Betriebs- oder Fehlerfall bestimmt, die restlichen Ströme I_q fließen über das Erdseil und andere über Erde selektierten Leiter (Kompensationsleiter).

Wenn alle beeinflussenden Ströme I (aus I_p und I_q) und die unterschiedlichen Koppelimpedanzen bekannt sind, kann durch die phasengerechte Summenbildung der induzierten Spannungen aller Leitern der Anzahl $k(1 \dots n$ ($n = p + q$)) die resultierende induzierte Spannung U_i berechnet werden.

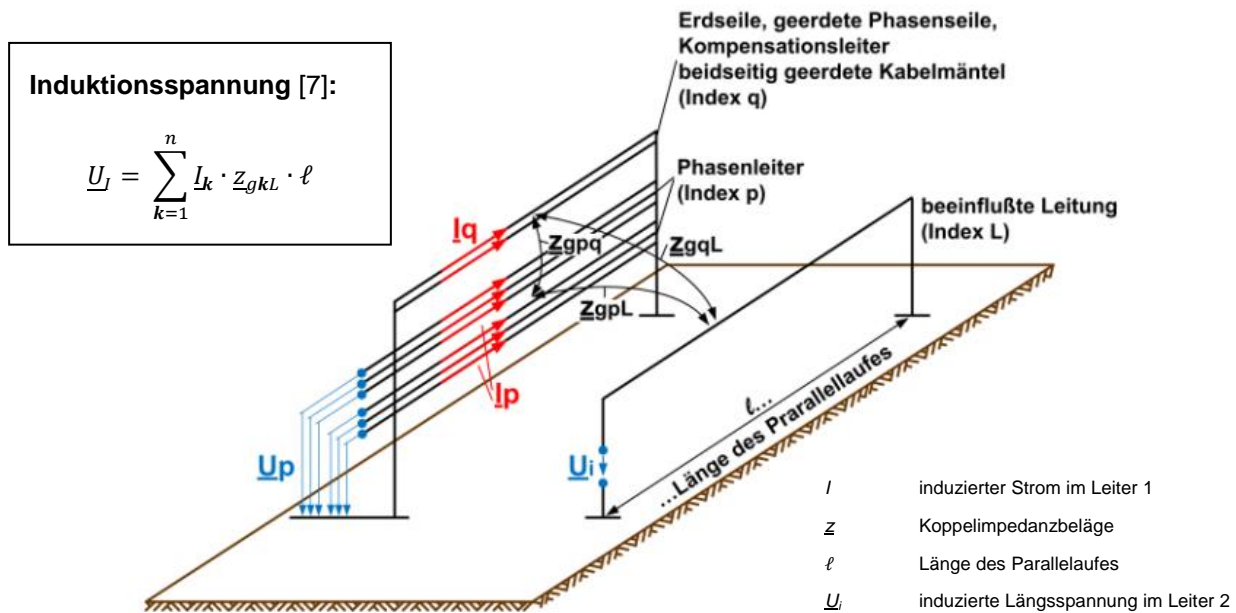


Abbildung 3-7: Allgemeines Beeinflussungsmodell der induktiven Beeinflussung [8]

Die weiteren Schritte für die Berechnung der induktiven Beeinflussungsspannung werden in Kapitel 5.1 betrachtet. Die technischen Richtlinien für die maximal zulässigen Beeinflussungsspannungen werden in Kapitel 3.5 zusammengefasst.

3.3. Elemente zur Rohrleitungsspannungsreduktion

3.3.1. Wechselstromerdungsanlagen

Erdungsanlagen werden dazu verwendet, um die Induktionsspannung, welche durch ein beeinflussendes System auf ein beeinflusstes System wirkt, zu reduzieren und auf ein ungefährliches Niveau zu bringen. Niederohmige Erdungsanlagen sind zu bevorzugen, da der Ausbreitungswiderstand der Erdungsanlage nicht größer als der Querswiderstand des modellierten Kettenleiters (siehe Kapitel 5.1) sein darf. [1] Aufgrund praktischer Erfahrungen wird empfohlen, dass der **Widerstandswert kleiner als 4 Ω** sein soll, da ansonsten die Auswirkung auf Beeinflussungsspannungen gering ist.

Abbildung 3-8 zeigt ein Beispiel, wie sich Widerstandswerte von unterschiedlichen Erdungsanlagen auf die Spannungsverläufe auswirken. Die Beeinflussung findet auf einer Länge von 10 km (von 0 bis 10) statt, als Referenz wird ein Beeinflussungsspannungsverlauf ohne Widerstand vorgegeben. Sowohl an der ersten als auch an der letzten Position ist eine Erdungsanlage eingebaut, wo der Wert des Ausbreitungswiderstandes variiert wird. Wie deutlich zu erkennen ist sinkt die maximale Spannung mit steigendem Widerstandswert, bei 0,5 Ω wird bei diesem Beispiel ca. die Hälfte des ursprünglichen Wertes erreicht.

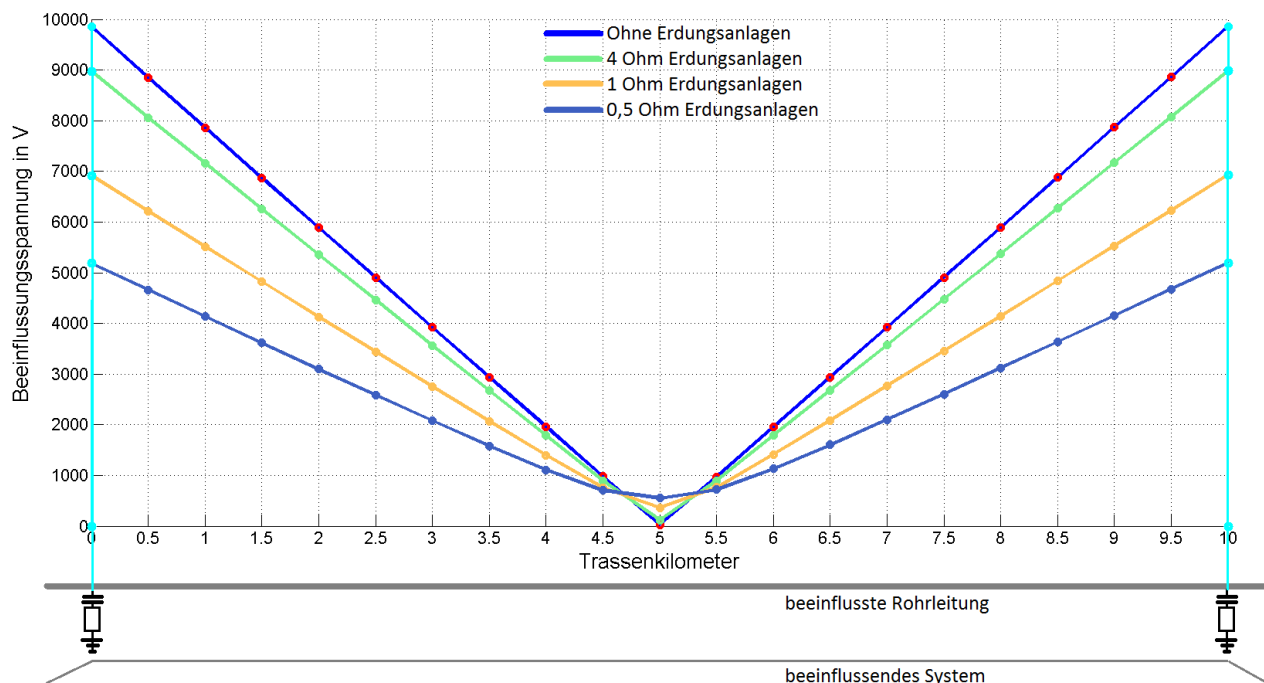
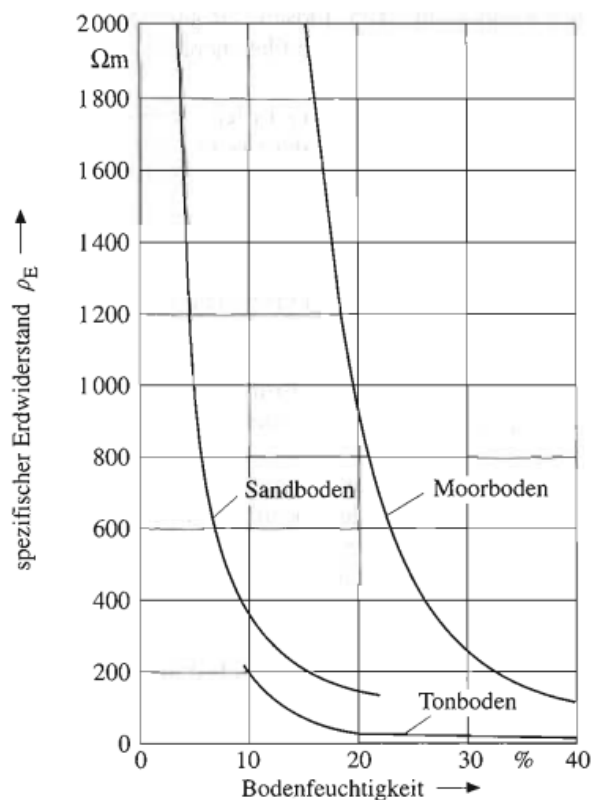


Abbildung 3-8: Variation der Widerstandswerte von Erdungsanlagen (Anlehnung an eine Abbildung in [9])

Man könnte sofort die Annahme treffen, dass immer die niedrigstohmigen Erdungsanlagen zu verwenden sind. Diese Möglichkeit steht zur Verfügung, aber geringere Erdungsanlagenwiderstandswerte bedeuten auch höhere Kosten, da bei niedrigen Widerstandswerten der technische Realisierungsaufwand steigt. Um aber eine technisch-wirtschaftliche Optimierung zu erreichen, sollten Erdungsanlagen gebaut werden, welche die zulässige Gefährdungsspannung nicht überschreiten und trotzdem kostenoptimiert sind.

Der Widerstandswert der Erdungsanlagen hängt vom **spezifischen Erdwiderstand** ab. Dieser ist je nach Untergrund und Bodenfeuchte unterschiedlich, außerdem schwankt der spezifische Erdwiderstand jahreszeitlich, welche eine technisch-wirtschaftliche Optimierung zusätzlich erschwert.



Der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens hat einen Einfluss auf den spezifischen Erdwiderstand. In Abbildung 3-9 ist zu sehen, wie der spezifische Erdwiderstand geringer wird, wenn die Bodenfeuchte steigt. Jedoch ist der Einfluss begrenzt, da ansonsten ein im Wasser befindlicher Erder einen idealen spezifischen Widerstandswert hätte. Im Allgemeinen ist aber eine in einem nassen Boden (z.B. Moor) verlegte Erdungsanlage niederohmiger als eine, die in einem trockenerem Boden verlegt ist [12].

Abbildung 3-9: Einfluss der Bodenfeuchtigkeit auf den spezifischen Bodenwiderstand [12]

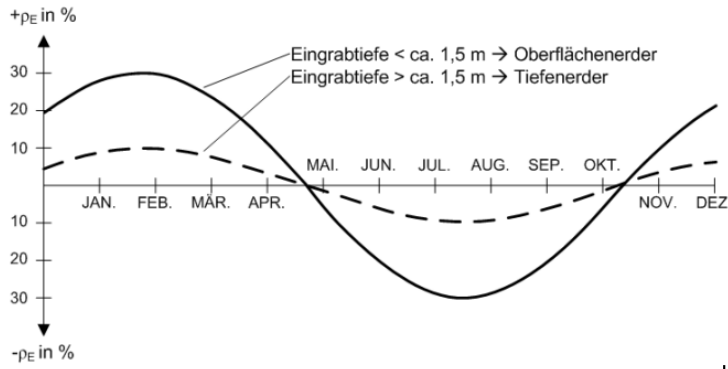


Abbildung 3-10: Jahreszeitliche Schwankung des spezifischen Bodenwiderstandes [12]

Die Ursache für die jahreszeitliche Schwankung ist, dass der spezifische Erdwiderstand einen negativen Temperaturkoeffizienten hat. Folglich erreicht dieser im Sommer ein Minimum, im Winter ein Maximum. Auf Tiefenerder hat diese Ursache eine wesentlich geringere Auswirkung, da die Temperatur in tieferen Bodenschichten relativ konstant ist. Bodennahe Erdungsanlagen können durch den spezifischen Bodenwiderstand Schwankungsbreiten bis zu $\pm 30\%$ haben [12].

Aufgrund der angeführten Problematik werden in der Literatur unterschiedliche Angaben über die spezifischen Erdwiderstände bei unterschiedlichen Bodenarten gemacht, welche eine große Schwankungsbreite aufweisen, daher wird in der Praxis ein geeigneter Durchschnittswert genommen oder der Erdwiderstand wird messtechnisch ermittelt. In jedem Fall muss der Ausbreitungswiderstand von Erdungsanlagen niedrig genug gewählt werden, damit auch bei einem ungünstigen spezifischen Bodenwiderständen die zulässige Gefährdungsspannung (die Induktionsspannung) nicht überschritten wird [12].

	Schwankungsbereich des spez. Bodenwiderstand in Ωm	Durchschnittswert des spez. Bodenwiderstand in Ωm
Moorboden	5 ... 40	30
Gartenboden (Lehm, Ton, Humus)	20 ... 200	100
Sand		
- feucht	200 ... 2500	200
- trocken		1000
Kies	2000 ... 3000	2500
Verwittertes Gestein	500 ... 1000	750
Granit	2000 ... 3000	2500
Felsen		10000

Tabelle 3-1: Schwankungsbreite und Durchschnittswerte von spezifischen Erdwiderständen [12]

Ist es das Ziel des Erreichens eines möglichst niedrigen Widerstandswertes einer Erdungsanlage, muss die Stromdichte beim Übergang zur Erde gering sein. Dazu muss die Länge des Erders im Vergleich zu seiner Breite oder Durchmesser sehr viel größer sein. Dies hat jedoch die Auswirkung, dass die Ausdehnung der Erdungsanlagen bei entsprechenden Ausbreitungswiderstandswerten empfindlich groß werden kann.

Der Ausbreitungswiderstand von Erdungsanlagen (R_E) errechnet sich näherungsweise aus dem Verhältnis von spezifischen Erdwiderstand (ρ_E) zu seiner räumlichen Ausdehnung (ℓ) [1].

<p>Ausbreitungswiderstand für einen Tiefenerder [1]</p> $R_E = \frac{\rho_E}{\ell}$	<p>Ausbreitungswiderstand für einen Horizontalerder [1]</p> $R_E = \frac{2 \cdot \rho_E}{\ell} \text{ für } \ell \leq 10m \text{ und } R_E = \frac{3 \cdot \rho_E}{\ell} \text{ für } \ell \geq 10m$
--	---

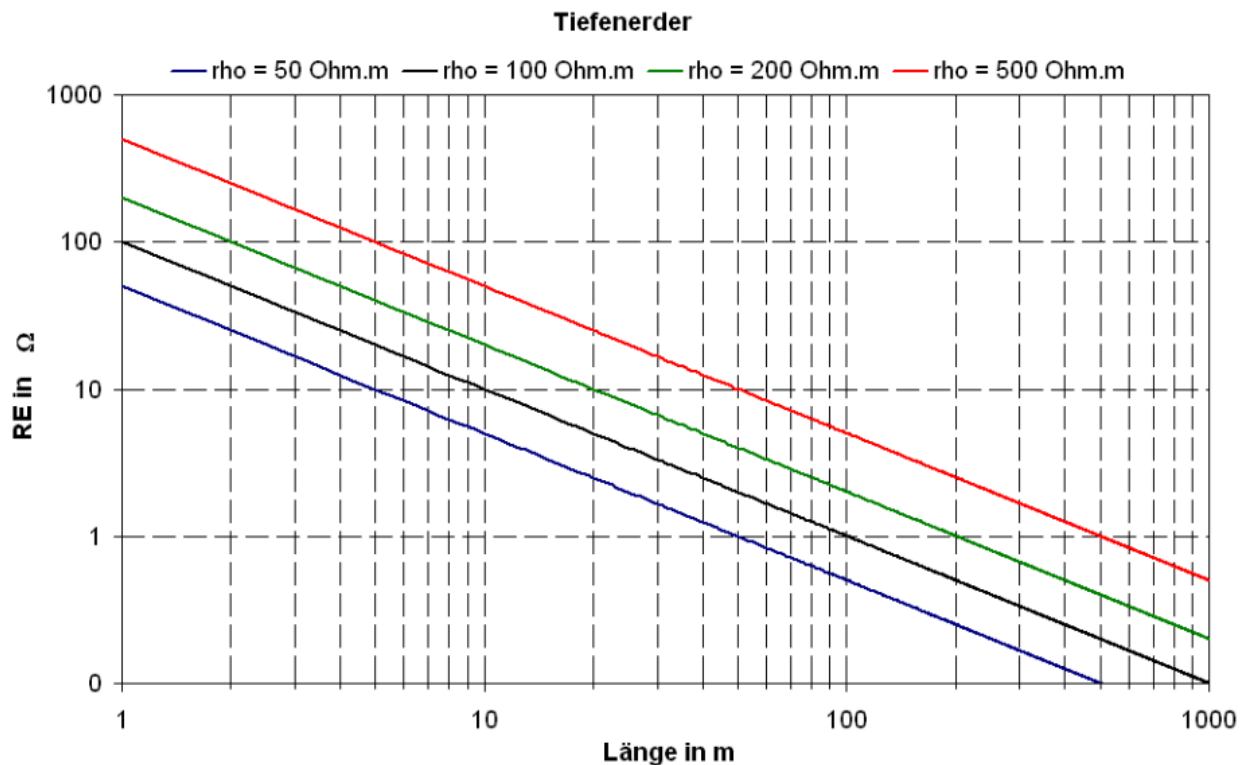


Abbildung 3-11: Ausbreitungswiderstand eines Tiefenerders [1]

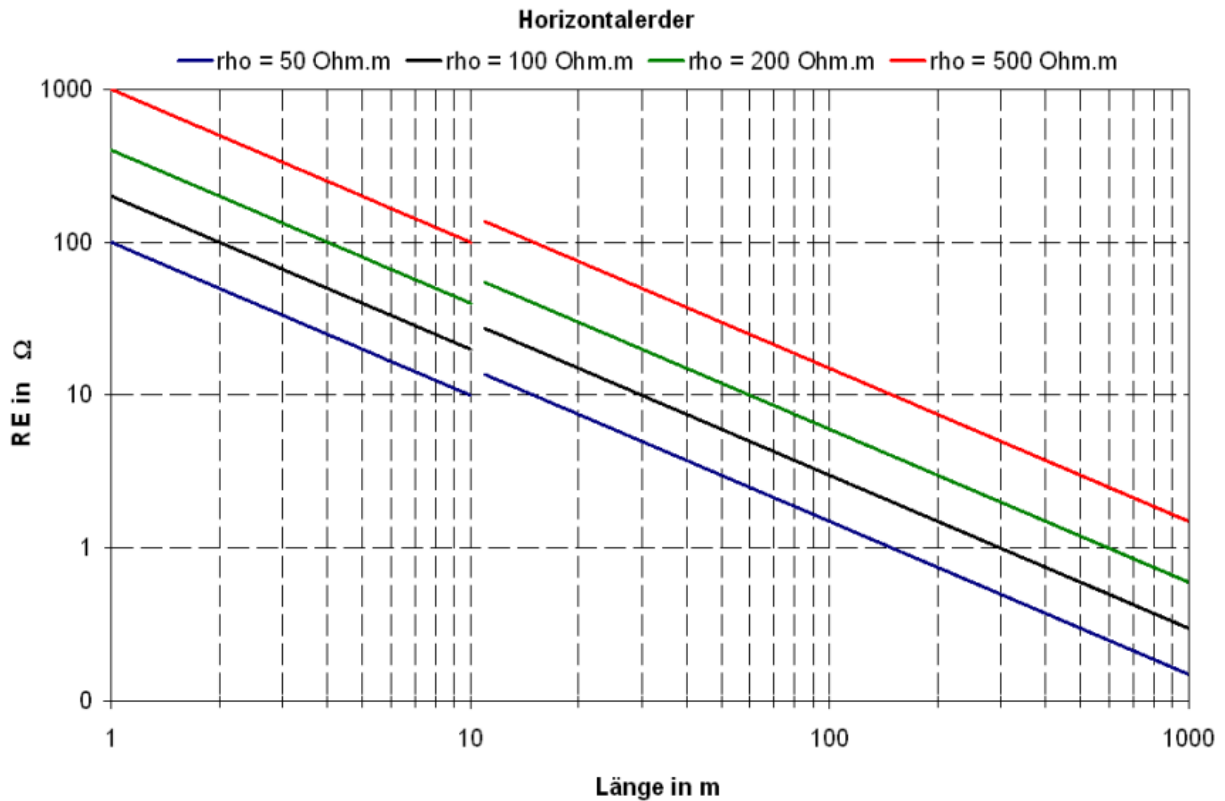


Abbildung 3-12: Ausbreitungswiderstand eines Horizontalerder [1]

Abbildung 3-11 und Abbildung 3-12 zeigt den Widerstandswert in Abhängigkeit von seiner räumlichen Ausdehnung.

- Tiefenerder
 - Bei ρ_E von **500 Ωm** beträgt die Länge für einen Tiefenerder mit **10 Ω** ca. **50 m**.
 - Bei ρ_E von **500 Ωm** beträgt die Länge für einen Tiefenerder mit **1 Ω** ca. **500 m**.
 - Bei ρ_E von **50 Ωm** beträgt die Länge für einen Tiefenerder mit **10 Ω** ca. **5 m**.
 - Bei ρ_E von **50 Ωm** beträgt die Länge für einen Tiefenerder mit **1 Ω** ca. **50 m**.
- Horizontalerder
 - Bei ρ_E von **500 Ωm** beträgt die Länge für einen Horizontalerder mit **10 Ω** ca. **120 m**.
 - Bei ρ_E von **500 Ωm** beträgt die Länge für einen Horizontalerder mit **1 Ω** ca. **1200 m**.
 - Bei ρ_E von **50 Ωm** beträgt die Länge für einen Horizontalerder mit **10 Ω** ca. **10 m**.
 - Bei ρ_E von **50 Ωm** beträgt die Länge für einen Horizontalerder mit **1 Ω** ca. **120 m**.

Wie aus den Berechnungen ersichtlich ist, sind hohe spezifische Erdwiderstände durch die räumliche Ausdehnung für Erdungsanlagen sehr kostenintensiv.

3.3.2. Isolierkupplung

Elektrisch wirksame Längstrennungen von Rohrleitungen (= Isolierkupplungen) sind eine weitere Möglichkeit, die zulässige Gefährdungsspannung nicht zu reduzieren. Isolierkupplungen trennen die eingekoppelte Spannung in einer isolierten, metallischen Rohrleitung, unterbrechen damit die metallische Leitfähigkeit einer Rohrleitung. Gleichzeitig werden Isolierkupplungen auch für den Korrosionsschutz (siehe Kapitel 3.4) verwendet. Bei der Trennstelle wird anstatt einer metallischen Verbindung eine aus nicht-leitendem Material verwendet, z.B. Beschichtungen aus Hartpapier oder Epoxidglasseidengewebe. Um Isolierkupplungen eine große Biegesteifigkeit (Biegemoment im Verhältnis zur Krümmung) zu geben, werden sie als vollverschweißte (Monobloc) Bauteile ausgeliefert.

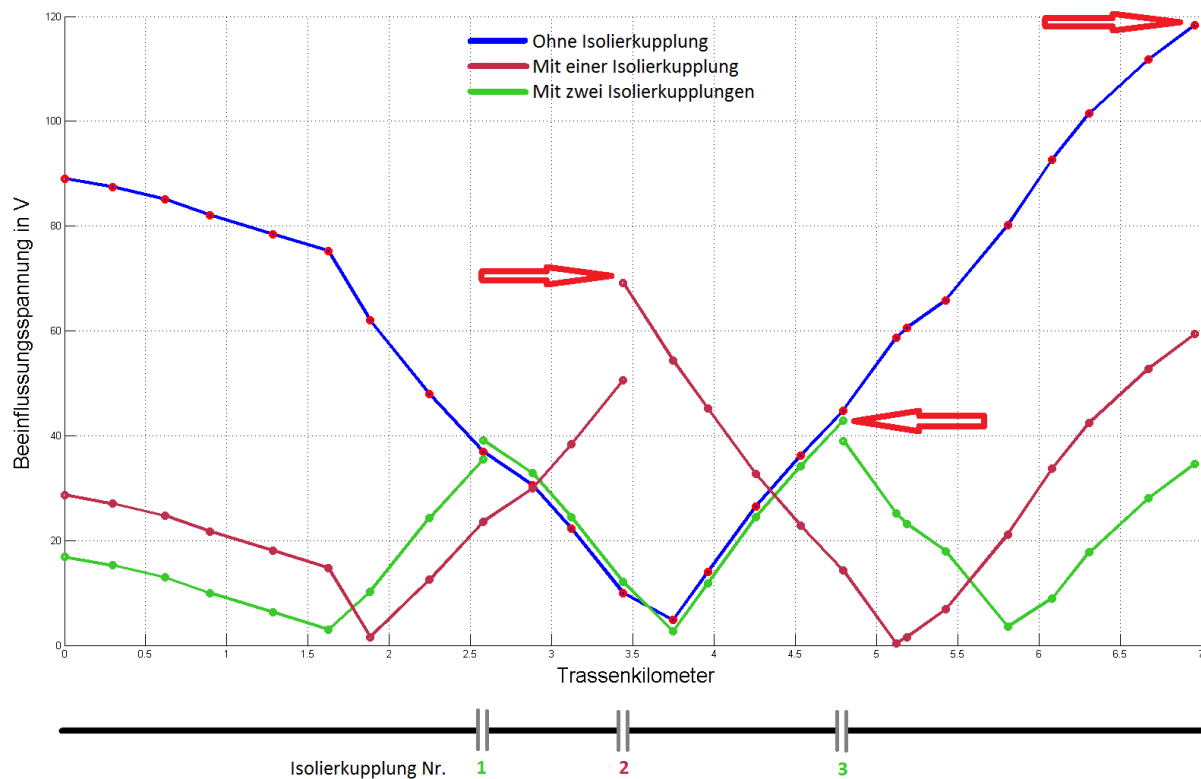


Abbildung 3-13: Spannungsverlauf bei unterschiedlichen Isolierkupplungen (Anlehnung an eine Abbildung in [9])

Abbildung 3-13 zeigt den Spannungsverlauf bei einer unterschiedlichen Anzahl von Isolierkupplungen. Die maximale Spannung wird in diesem Beispiel niedriger (rote Pfeile markieren die maximale Spannung) je mehr Isolierkupplungen verwendet werden.

Isolierkupplungen werden meistens im Zuge eines Neubauprojektes realisiert, da ein nachträglicher Einbau entweder sehr aufwendig oder nicht möglich ist. Daher werden zur Reduzierung der eingekoppelten Spannungen bei einem bestehendem System Wechselstromerdungsanlagen bevorzugt, wobei eine korrekte und wirtschaftlich optimierte Verortung umso höhere Relevanz bekommt.

3.4. Wechselstromkorrosion

Erdungsanlagen werden nicht nur wegen den maximal zulässigen Gefährdungsspannungen eingebaut, sondern auch zur Reduktion der Wechselstromkorrosionsgefährdung. Unter Wechselstromkorrosion versteht man einen elektrochemischen Angriff auf metallische Werkstoffe und der damit einhergehenden langsamen Zerstörung. Bei im Erdboden verlegten Rohrleitungen findet meist eine Loch-Korrosion infolge von punktförmiger Zerstörung der Rohrisolierung durch das umliegende Erdreich (z.B. Steine) statt [13].

Die Korrosionswahrscheinlichkeit in Folge von eingekoppelter Wechselspannung ist verbunden mit der Wechselstromdichte an der schadhaften Stelle der Rohrisolierung und dem dadurch fließenden vagabundierenden Strom zwischen der Rohrleitung und dem umgebenden Erdreich. Weitere wichtige Faktoren sind unter anderem Reste des vorhandenen Korrosionsschutzes, das Wechsel/Gleichstrom-Verhältnis und der pH-Wert des umgebenden Erdreiches. Eine Korrosionserscheinung tritt dann ein, wenn an der schadhaften Stelle der Korrosionsschutz durchbrochen wird und ein vagabundierender Strom zwischen der nun nicht mehr isolierten, metallischen Rohrleitung und dem umgebenden Boden fließt und dabei direkt auf das Metall der Rohrleitung ein elektrochemischer Angriff stattfindet. Ein vagabundierender Strom ist ein Streustrom welcher nicht auf seinem vorbestimmten Weg fließt, sondern einen Weg durch besser leitende Strukturen sucht. Seine Höhe ist von unterschiedlichen Parametern abhängig, wie z.B. spezifischer Erdwiderstand, Stromdichte des Wechselstromes an der Fehlstelle, Größe an der Fehlstelle, chemische Bodenzusammensetzung und Ionenleitfähigkeit (= Bodenfeuchte) [13] [14] [4].

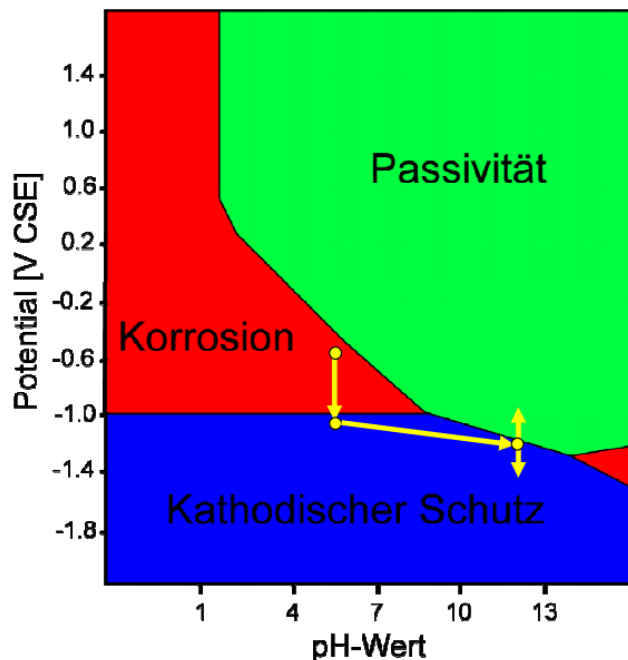


Abbildung 3-14: pH-Wertverschiebung durch Kathodischen Schutz [12]

Damit die Korrosionsgefährdung nicht auftritt, darf kein vagabundierender Strom auftreten. In sehr vielen Fällen ist dies aber nicht möglich, so muss die Gefährdung durch verschiedene Maßnahmen auf ein Minimum gebracht werden, damit die Korrosion nicht höher als 10µm/Jahr ist [14].

Die erste und einfachste zu realisierende Barriere ist der passive Korrosionsschutz. Dazu wird die metallische Rohrleitung mit einem nicht-metallischen Isolationsmaterial umgeben. Diese verhindert Schäden, da die Rohrleitung von angreifenden korrosiven Einkopplungen mechanisch getrennt ist, jedoch verhindert es nicht, dass die Rohrleitung die generelle Fähigkeit verliert zu korrodieren. Wird dieser passive Schutz verletzt, kann nun ein vagabundierender Strom fließen.

Unter den richtigen Bedingungen kann es an dieser Stelle zu einer Korrosion kommen, falls keine geeigneten weiteren Maßnahmen getroffen werden [13].

Ist der passive Korrosionsschutz der Rohrummantelung defekt, müssen zusätzlich folgende Maßnahmen getroffen werden:

- Aktiver Korrosionsschutz: dazu werden Kathodenschutzanlagen verwendet, welche mit potentialgesteuerten Gleichrichtern einen Schutzstrom erzeugen, welcher den Streustrom kompensieren soll. Dadurch kann der pH-Wert an der Oberfläche der Leitung erhöht werden (siehe Abbildung 3-14).
- Isolierkupplungen: Damit wird eine Verschleppung des Streustromes über längere Entfernungen verhindert und die Beeinflussungsspannung an der Rohrleitungsanlage reduziert.
- Erdungsanlagen: Ist die häufigste Maßnahme, um ein Versagen des Korrosionsschutzes zu kompensieren. Dazu wird der induzierte Strom über die Erdungsanlagen abgeleitet. Jedoch ist die Materialwahl zu beachten, da es ansonsten bei der Verbindung zwischen der Rohrleitung und der Erdungsanlage zu einer Kontaktkorrosion kommen kann. Auch muss beachtet werden, dass bei Erdungsanlagen Eigenkorrosion auftritt, welche den Widerstandswert im Laufe der Zeit erhöht [12].

Der Metallabtrag (Korrosion) wird eindeutig bestimmt durch die Einwirkungszeit und der Stromstärke. Die Wechselstromstärke (Stromdichte) wiederum hängt stark von der Potentialdifferenz ab, welche einwirkt. Tabelle 3-2 zeigt die Menge vom aufgelösten Metall im Laufe eines Jahres bei einem konstanten Gleichstrom von 1 mA, bei Wechselstrom reduziert sich dieser Wert circa um den Faktor 10. Wird also die einwirkende Potentialdifferenz durch oben genannte Maßnahmen kleiner, wird der Strom kleiner und damit sinkt der Einfluss auf die Korrosionswirkung. [12].

Metall	Aufgelöste Menge in Gramm	Aufgelöste Menge in cm ³	Linearabtrag in mm/Jahr
Aluminium	2,9	1,1	0,11
Eisen	9,1	1,2	0,12
Kupfer	10,4	1,2	0,12
Kupfer, feuerverzinkt	10,7	1,5	0,15
Zink	10,7	1,5	0,15
Stahl, feuerverzinkt	10,7	1,5	0,15
Stahl in Beton	9,1	1,2	0,12
Stahl nicht rostend	9,0	1,2	0,12

Tabelle 3-2 :Wirkung von Korrosionsströme (Gleichstrom) [12]

3.5. Richtlinien

TE 30 [3]

Die TE 30 (Technische Empfehlung 30) behandelt die Vermeidung von unzulässigen Beeinflussungen infolge von Näherungen und Kreuzungen zwischen beeinflussten Systemen (isolierte metallische Rohrleitungen) und beeinflussenden Systemen (Hochspannungsfreileitungen und elektrische Bahnanlagen). Diese Empfehlung gilt nicht für Gleichstrombahnen (Straßenbahnen etc.). In dieser Arbeit wird ein Überblick über die Kriterien zur Beurteilung der Beeinflussungsspannung an Rohrleitungen erstellt, genaue Details finden sich unter [3].

Eine Untersuchung kann unterlassen werden, wenn Hochspannungsleitungen und elektrische Bahnanlagen

- sich weiter als 1000m weg von einer Rohrleitung befinden oder
- wenn der Kreuzungswinkel zwischen beiden Systemen größer als 55° ist.

In allen anderen Fällen muss eine anerkannte Berechnungsmethode angewandt und anschließend nach gewissen Kriterien beurteilt werden, ob weiterführende Maßnahmen erfolgen müssen.

Grenzwerte für das Rohrleitungspotential U_R	Art der Beeinflussung	Maßnahmen zum Schutz gegen unzulässige Berührungsspannungen (nach TE30)
$U_R \leq 65 \text{ Volt}$	Langzeit	keine
$U_R \geq 65 \text{ Volt}$	Langzeit	Anschluss von Erdern oder Potentialsteuerung zur Herabsenkung von U_R auf weniger als 65 Volt
$U_R \leq 500 \text{ Volt}$	Kurzzeit	keine
$500 \text{ Volt} < U_R \leq 2000 \text{ Volt}$	Kurzzeit	Anschluss von Erdern oder Potentialsteuerung zur Herabsenkung von U_R auf weniger als 500 Volt
$U_R > 2000 \text{ Volt}$	Kurzzeit	Anschluss von Erdern zur Herabsenkung von U_R auf weniger als 2000 Volt und zusätzliche Maßnahmen [3] oder Anschluss von Erdern zur Herabsenkung von U_R auf weniger als 500 Volt

Tabelle 3-3: Grenzwerte für Rohrleitungspotentiale

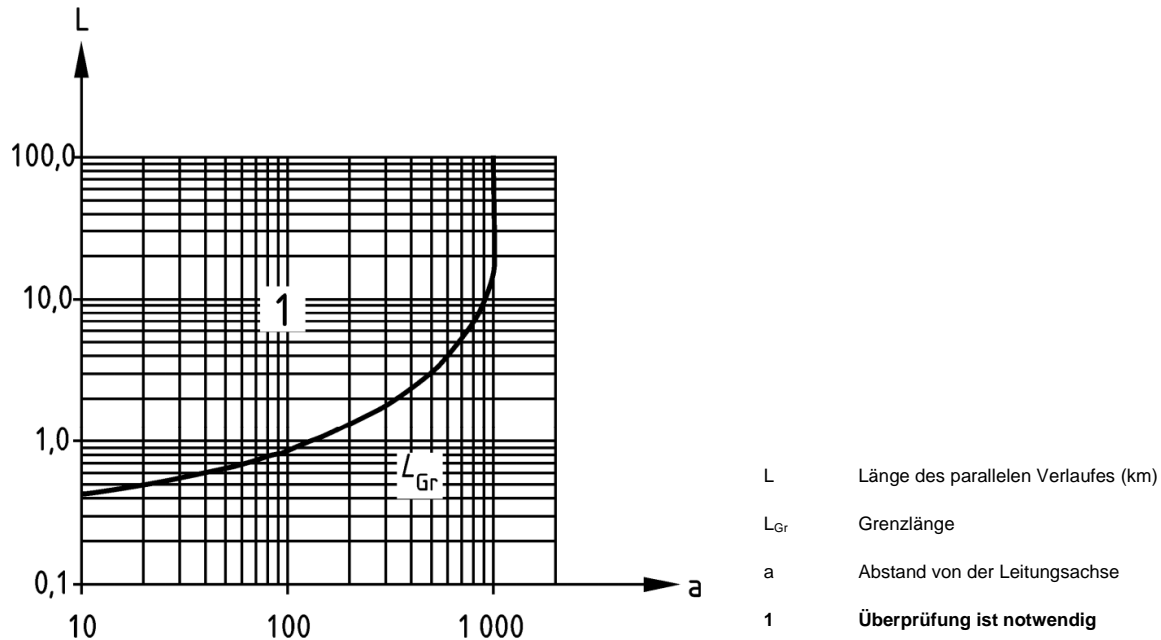


Abbildung 3-15: Kriterium für die Notwendigkeit der Prüfung von Beeinflussungsmöglichkeiten bei Hochspannungsleitung [3].

Wenn die Länge der Parallelführung kleiner als die Grenzlänge L_{Gr} ist, dann ist keine Untersuchung notwendig. Bei sinkendem Abstand der zwei Systeme wird auch die tolerierbare Länge der Parallelführung kleiner: $a = 1000\text{m} \rightarrow L_{Gr} = \text{ca. } 15\text{km}$; $a = 100\text{m} \rightarrow L_{Gr} = \text{ca. } 0,85\text{km}$

CEN/TS 15280 [4]

Die technische Spezifikation betrifft die Korrosionswahrscheinlichkeit durch Wechselstrom an erdverlegten Rohrleitungen. Die theoretischen Erläuterungen wurden bereits in 3.4 durchgeführt.

Eine Untersuchung muss **nicht** durchgeführt werden, wenn **Hochspannungsleitungen**

- sich weiter als 1000 m weg von einer Rohrleitung befinden.

Eine Untersuchung muss **nicht** durchgeführt werden, wenn **elektrische Bahnanlagen**

- sich weiter als 1000 m weg von einer Rohrleitung befinden für den Fall, dass der spezifische Bodenwiderstand kleiner als $3000 \Omega\text{m}$ ist.

Um die Korrosionswahrscheinlichkeit in Folge von Wechselstrom zu verringern, muss bei einem örtlichen spezifischen Erdwiderstand entlang einer erdverlegten Rohrleitung von mehr als $25 \Omega\text{m}$ die Wechselspannungen an der Rohrleitung kleiner als 10 Volt sein. Ist der spezifische Erdwiderstand hingegen kleiner als $25 \Omega\text{m}$, muss die Wechselspannung an der Rohrleitung kleiner als 4 Volt sein.

4 EINFÜHRUNG IN DIE ALGORITHMEN

4.1. Grundlagen

Was ist ein Algorithmus? Ein Algorithmus ist kurz gesagt eine vordefinierte Rechenvorschrift, wie aus einer Anzahl von Eingaben eine Anzahl von Ausgaben erzeugt werden kann. Dazu gibt es eine Folge von Rechenschritten, (auch Anweisungen genannt), die die Eingabe über eine korrekte Bearbeitung löst. Man kann dazu sagen, der Algorithmus beschreibt eine Vorschrift, der eine Eingabe-Ausgabe-Beziehung erzeugt [15].

Wenn das Wort „Algorithmus“ fällt, denken viele Menschen sofort, dass es mit Informatik oder Technik zu tun hat. Das Beispiel auf der rechten Seite (Abbildung 4-1) demonstriert jedoch, dass Algorithmen immer und überall existieren und eigentlich das tägliche Tun eines Menschen beherrschen.

Abbildung 4-1 zeigt ein Flussdiagramm (siehe 5.7) einer simplen Tätigkeit namens „Wäsche waschen“. Sie hat eine Eingabe („Ich will Wäsche waschen“) und eine Ausgabe („Wäsche gewaschen und getrocknet“), verschiedene Schritte (rechteckige Felder) und verschachtelte Anweisungen (rautenartiges Feld) – mit einem Ziel: Korrekt den Algorithmus „Wäsche waschen“ abzuarbeiten.

Ein Algorithmus wird dann als korrekt bezeichnet, wenn er für jede Eingabe mit der richtigen Ausgabe stoppt, also das eigentliche Rechenproblem löst. Ein inkorrekt Algorithmus führt im Gegensatz dazu, dass er gar nicht mehr stoppt („Endlosschleife“) oder im schlimmeren Fall wird ein scheinbar richtiges Ergebnis angezeigt, welches aber eigentlich ein Falsches ist [15] [16].

Wenn der Algorithmus bei jeder Eingabe nur definierte und reproduzierbare Zustände hat, dann spricht man von einem deterministischen Algorithmus. Diese Eigenschaft ist nur eine von vielen Relevanten, die im folgenden Kapitel 4.2 beschrieben werden.

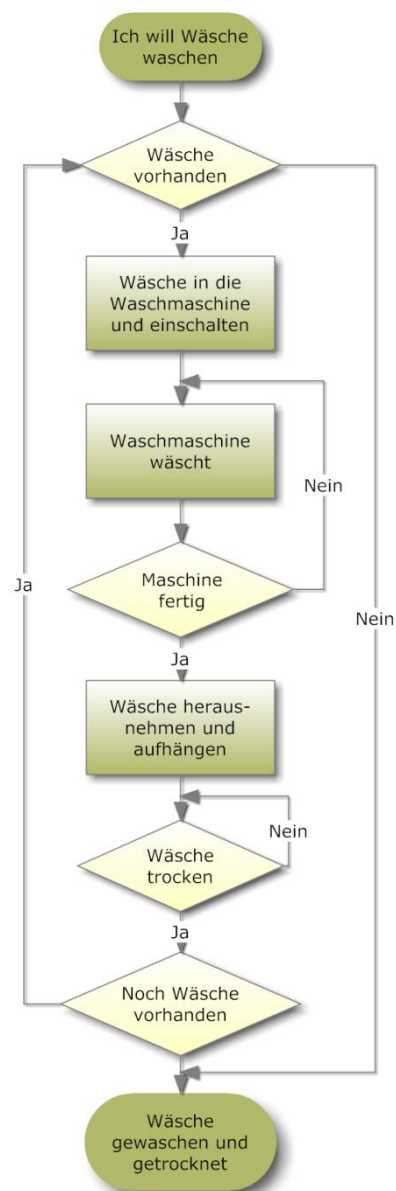


Abbildung 4-1: Bsp. Wäsche waschen

4.2. Eigenschaften eines Algorithmus

- **Determiniertheit**

Determiniertheit bedeutet im Prinzip, dass bei der gleichen Eingabe immer die gleiche Ausgabe erfolgt. Die Zwischenschritte müssen nicht zwangsläufig bei jeder Ausführung gleich sein (z.B. randombasierende Algorithmen – Quicksort mit zufälliger Auswahl des Startelementes) [16] [17].

- **Determinismus**

Ein deterministischer Algorithmus hat immer definierte und reproduzierbare Zustände. Anders ausgedrückt, folgt auf eine Anweisung unter gleichen Voraussetzungen immer die gleiche Anweisung (immer der gleiche Weg). Es bedeutet auch, dass alle Zwischenergebnisse immer gleich und reproduzierbar sind. Zwangsläufig ist damit ein deterministischer Algorithmus immer determiniert, die Umkehrung gilt jedoch nicht [16] [18].

- **Endlichkeit**

Wird auch Finitheit genannt. Bei der statischen Finitheit besitzt die Beschreibung (Quelltext) des Algorithmus eine begrenzte Anzahl von Zeichen. Die dynamische Finitheit besagt dass die Ausführung des Algorithmus nur beschränkt viel Speicherplatz benötigen darf [16].

- **Terminiertheit**

Bedeutet, dass ein Algorithmus nach endlich vielen Schritten kontrolliert abbricht (terminiert). Dies gilt für alle Eingabemöglichkeiten, da ansonsten der Algorithmus in eine Endlosschleife übergeht und damit nicht terminiert.

Es gibt hier aber einige Ausnahmen. Viele vollautomatische Programme (z.B. Regelsteuerungen, Betriebssysteme) laufen beabsichtigt in einem Endlosmodus, es sei denn der Benutzer gibt den Befehl zum Beenden [16].

- **Komplexität**

Für die Lösung der Eingabe-Ausgabe-Beziehung stehen nur begrenzte Betriebsmittel eines Computers zur Verfügung. Es sind nur Algorithmen interessant, die eine vertretbare Menge davon verbrauchen. Bei einem Algorithmus sind als Betriebsmittel vorwiegend Speicherbedarf (um Zwischenergebnisse zu speichern) und Zeit (Start- und Endzeitpunkt eines Algorithmus) interessant, nur Algorithmen mit vertretbarem Verbrauch werden als durchführbar bezeichnet. Dies wird jedoch in Kapitel 4.3 gesondert betrachtet [15] [19].

4.3. Effizienz von Algorithmen

4.3.1. Komplexitätstheorie und Anforderungen

Die Komplexitätstheorie ist ein Teilbereich der Theoretischen Informatik. Diese befasst sich ausschließlich mit der Komplexität von Algorithmen, wo der Betriebsmittelverbrauch gemessen und beurteilt wird. Wie bereits erwähnt, sind die zwei wichtigsten Betriebsmittel der Speicherbedarf und die Zeit. Dadurch ergibt sich die Aufgabe, die effizient lösbaren Probleme von den schwierigen (oder sogar unlösbaren) Problemen abzugrenzen. Genaueres über diese Theorie kann unter [20] nachgelesen werden. In diesem Unterkapitel wird aber ein praktischer Bezug zu diesem Thema angesprochen [15] [19] [20].

Viele Probleme können mit den unterschiedlichsten Algorithmen gelöst werden, wo es mehrere Punkte zu beachten gibt [15] [19]:

- Viele Lösungskandidaten können ein Problem gar nicht lösen, oder nur auf ineffiziente Art und Weise. Das Herausfinden des richtigen Algorithmus für die Aufgabenstellung kann sowohl literaturtechnisch als auch programmiertechnisch eine zeitintensive Herausforderung darstellen.
- Die Menge der zu verarbeitenden Eingabedaten spielt eine entscheidende Rolle. Es gibt Algorithmen, die im Vergleich für kleine Mengen schnell sind, aber bei großen Mengen ein exponentielles Wachstum aufweisen. Im Gegensatz dazu existieren Algorithmen, welche dieselbe Problematik bei kleineren Mengen wesentlich langsamer bearbeiten, jedoch ein logarithmisches Wachstum besitzen.
- Nicht zuletzt entscheidend ist die praktische Anwendung darüber. Hier als Beispiel zu erwähnen wäre das Problem des kürzesten Weges, wie es bei GPS-Navigationsgeräte verwendet wird. Schließlich möchte man den kürzesten, schnellsten und treibstoffsparendsten Weg gezeigt bekommen, jedoch im richtigen Moment eine Entscheidung über eine alternative Route haben, falls sich ein Stau auf dieser Route befindet.

4.3.2. Komplexitätsklassen

Algorithmen werden entsprechend ihres Ressourcenverbrauchs in Komplexitätsklassen zusammengefasst. Wie bereits erwähnt, sind dies Speicherbedarf (Platzkomplexität) und Zeit (Zeitkomplexität), wobei die obere Schranke, also der maximale Verbrauch der Ressource, entscheidend ist. Andere Betriebsmittel sind auch Verfügbar (z.B. mittlere Laufzeit bei randombasierenden Eingaben), jedoch spielen diese im Allgemeinen nur eine geringe Rolle [21].

Durch die Komplexitätsklassen ist nur die obere Grenze des Ressourcenbedarfs festgelegt, womit eine Hierarchie gebildet wird. Somit ist die weniger mächtige Klasse jeweils in der nächst-höheren Klasse enthalten [21].

Die Komplexität wird häufig mit Hilfe der Notation der Landau-Symbole (siehe 4.3.6) beschrieben. Die Schwierigkeit bei der Bestimmung der Komplexität eines Problems ist, dass man alle Algorithmen eines Problems betrachten muss. Man muss also zeigen, dass der Algorithmus für das Problem der am besten geeignete ist. Die Komplexitätsklasse ist nur mit einer konkreten Implementierung auf einer Maschine (z.B. Turingmaschine) feststellbar [21].

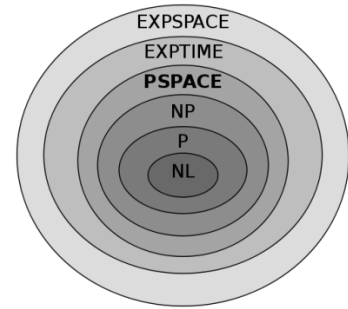


Abbildung 4-2: Einteilung der Komplexitätsklassen

In Abbildung 4-2 werden folgende Komplexitätsklassen beschrieben [22]:

- EXPSPACE: Von einer deterministischen Turingmaschine auf linear exponentiellem Speicherplatz lösbar
- EXPTIME: Von einer deterministischen Turingmaschine in exponentieller Zeit lösbar
- PSPACE: (auch NPSPACE) – Von einer deterministischen Turingmaschine auf polynomiell¹ Speicherplatz lösbar
- NP: Von einer nichtdeterministischen Turingmaschine in polynomieller Zeit lösbar
- P: Von einer deterministischen Turingmaschine in polynomieller Zeit lösbar
- NL: Von einer nichtdeterministischen Turingmaschine auf logarithmischen Speicherplatz lösbar

Abbildung 4-3 zeigt das Wachstum von Funktionen in Abhängigkeit einer streng monoton steigenden Variable x . Die Exponentialfunktion ist als grüne Kurve dargestellt, die blaue Kurve ist eine Polynomfunktion 3ten Grades und die rote Kurve eine Linearfunktion mit dem Faktor 50.

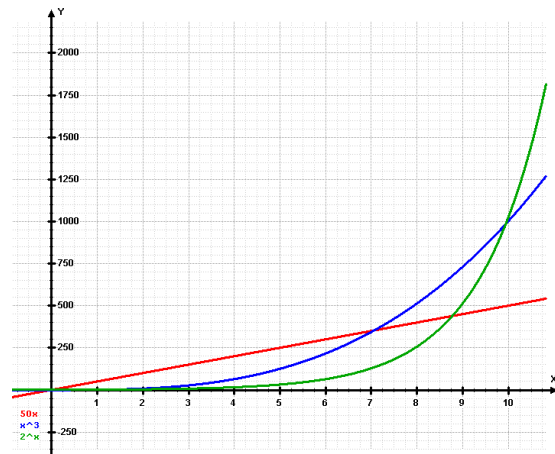


Abbildung 4-3: Wachstumsfunktionen von Kurven

Natürlich gibt es noch weitere Komplexitätsklassen, diese und ihre Beschreibung ist unter [22] zu finden. Vermutlich das populärste Problem ist die NP-Vollständigkeit. Damit wird beschrieben, dass das Problem vermutlich nicht effizient, also nicht in polynomieller Zeit gelöst werden kann, man spricht auch von einem „harten Problem“ ([15], Kapitel 34). „Vermutlich“ deswegen, weil man bis dato noch keinen effizienten Algorithmus gefunden hat [15].

¹ Unter polynomiell versteht man das Wachstum einer Funktion, welche größer als eine Linearfunktion, aber kleiner als eine Exponentialfunktion ist

4.3.3. Effizienz

Ausgehend von der Annahme, dass unendlich schnelle Rechner und unendlich viel Speicherplatz existieren, würde sich niemand dafür interessieren, wie der Algorithmus aufgebaut ist oder wie man einen schnelleren und komplizierteren entwickelt könnte. Beachtenswert wäre lediglich, dass der Algorithmus richtig determiniert und terminiert. Folglich könnte jener Algorithmus ausgewählt werden, der leicht in ein Programm eingebettet werden kann [15].

Die Realität sieht jedoch anders aus. Rechner sind nicht unendlich schnell, und Speicherplatz kostet Geld. Wie bereits erwähnt, soll aufgrund dieser zwei Betriebsmittel ein so effizienter Algorithmus wie möglich verwendet werden. Dabei ist es nicht so entscheidend, welche Hard- und Software verwendet wird, sondern oft sind die Laufzeiten von zwei Algorithmen, die im Prinzip das gleiche Problem lösen, so unterschiedlich, dass selbst ein vermeintlich schwacher Rechner das Problem schneller löst [15].

Dazu gibt es ein praktisches Beispiel, welches unter [15], S.12, zu finden ist.

Es muss ein Feld mit 10.000.000 (10 Millionen $\hat{=}$ $2^{23,254}$) Zahlen sortiert werden, wobei es zunächst eine einfache Aufgabe darstellt. Mit 64-bit Zahlen werden gerade mal 80MB an Speicher belegt, selbst in den Hauptspeicher eines einfachen Laptops kann dieses Feld gespeichert werden.

Dazu gibt es zwei Rechner. Rechner A kann 10 Milliarden Anweisungen in der Sekunde rechnen, Rechner B jedoch nur 10 Millionen Anweisungen, was um den Faktor 1000 niedriger ist.

Auf Rechner A wird ein nahezu perfekter Algorithmus „Sortieren durch Einfügen“ (auch Bubble-Sort) programmiert, um mit einer Sortierzeit von $2n^2$ n Zahlen zu sortieren.

Auf Rechner B programmiert ein Hobby-Programmierer einen ineffizienten Algorithmus „Sortieren durch Mischen“ (auch Merge-Sort), der für n Zahlen eine Laufzeit von $50 n \lg n$ braucht um die Zahlen zu sortieren.

Laufzeit Rechner A:

$$\frac{2 \cdot (10^7)^2 \text{Anweisungen}}{10^{10} \text{Anweisungen/Sekunde}} = 20.000 \text{ Sekunden (mehr als } 5 \frac{1}{2} \text{ Stunden)}$$

Laufzeit Rechner B:

$$\frac{50 \cdot 10^7 \lg 10^7 \text{ Anweisungen}}{10^7 \text{ Anweisungen/Sekunde}} = 1.163 \text{ Sekunden (rund 20 Minuten)}$$

Nun ist deutlich zu sehen, dass man mit einem um Faktor 1000 langsameren Rechner eine 17-mal schnellere Sortierzeit erreichen kann, wenn man einen für die Aufgabe effizienten Algorithmus findet.

4.3.4. Schlechtester und mittlerer Fall von Laufzeiten

Der Aufwand im schlechtesten Fall (worst case) ist vor allem für Realtime-Systeme interessant, wo die Antwortzeit des Systems eine gewisse maximale Zeit nicht überschreiten darf. Diese Zeit darf auch im schlechtesten Fall nicht überschritten werden.

Auf Algorithmen angewandt heißt das, dass bei jeder beliebigen Eingabe der Größe n eine von n abhängige obere Schranke für die Laufzeit eines Algorithmus existiert. Daraus ergibt sich die Garantie, dass selbst bei der schlechtesten Eingabe diese maximale Laufzeit nicht überschritten wird. Es gibt allerdings Algorithmen, bei denen dieser schlechteste Fall sehr häufig auftritt. Als Beispiel wäre hier der Suchalgorithmus angebracht, der eine ganze Datenbank nach gesuchten Informationen durchforsten muss, die aber eigentlich nicht vorhanden sind [15] [19].

Der Aufwand ist im Durchschnitt meist annähernd so schlecht wie der schlechteste Fall (siehe sortieren von Feldern), da die Wachstumsfunktionen (siehe 4.3.5) dasselbe Verhalten haben.

In einigen Fällen ist die mittlere Laufzeit jedoch besonders interessant. Dazu muss als Annahme getroffen werden, dass häufig auftretende Eingaben einen Durchschnitt repräsentieren. Voraussetzung dafür ist eine gleichförmige Normalverteilung, bei der besonders gute oder schlechte Eingaben einen wesentlich geringeren Wahrscheinlichkeitsgrad haben. In der Praxis wird die mittlere Laufzeit gerne für randomisierte Algorithmen verwendet, da die Laufzeit entsprechend der Randeingabe variiert. Dies führt zu einer erwarteten Laufzeit [15].

4.3.5. Wachstumsgrad

Um Laufzeiten relativ einfach bestimmen zu können, wird der Wachstumsgrad verwendet.

Man betrachte die Funktion $f(n) = a \cdot n^2 + b \cdot n + c$. Diese Funktion repräsentiert die Laufzeit eines Algorithmus.

Mit steigenden n wird der erste Ausdruck $a \cdot n^2$ wesentlich schneller steigen als der Rest, diese fallen bei hohen n nicht mehr ins Gewicht. Außerdem werden die konstanten Koeffizienten weggelassen, da diese nur bei kleinen n interessant sind, jedoch wesentlich weniger signifikant bei der Wachstumsrate sind. Werden Terme niedrigerer Ordnung und Konstanten ignoriert, bleibt nur mehr der Ausdruck n^2 übrig. Damit wird die Laufzeit des Algorithmus mit der Notation $\Theta(n^2)$ oder $O(n^2)$ beschrieben. Die Notation wird ausführlicher in Kapitel 4.3.6 behandelt [15] [19].

Schlussendlich werden Algorithmen effizienter als andere betrachtet, wenn die Wachstumsfunktion für die Laufzeit geringer ist. Dies gilt jedoch nicht unbedingt, wenn nur kleine Eingabegrößen verwendet werden, hier kann der konstante Faktor durchaus der dominierende Teil sein [15].

4.3.6. Laufzeiten im Zusammenhang mit asymptotischer Notation

Unter Notation versteht man im Prinzip die Beschreibung der asymptotischen Effizienz (Laufzeit) von Algorithmen. Darunter versteht man, wie die Laufzeit eines Algorithmus mit der Größe der Eingabe im Limes zunimmt, wenn die Eingabe ohne Beschränkung anwächst [15].

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Notation zu beschreiben bzw. zu beschränken. Vorwiegend wird die Θ -Notation (Funktion ist sowohl nach oben als auch nach unten asymptotisch beschränkt) und die O-Notation (Funktion verfügt nur eine obere asymptotische Schranke) verwendet. $O(f)$ ist die Menge aller Funktionen g für die gilt: $g=O(f) \wedge f = O(g)$. Man sagt, g hat dasselbe asymptotische Verhalten wie f [15] [19].

Laufzeiten von Algorithmen werden gewöhnlich in der O-Notation angegeben, um zu verstehen, wie schnell eine Funktion mit steigender Anzahl an Eingaben n wächst. Diese Notation wird dazu verwendet, um die Laufzeit im schlechtesten Fall (worst-case-Szenario) anzugeben.

Wie bereits in Kapitel 4.3.3 ausführlich und deutlich gezeigt wurde, kann die gleiche Aufgabe mit zwei unterschiedlichen Algorithmen, welche zwei gänzlich unterschiedliche Notationen haben, berechnet werden. Hinsichtlich des Zeitverbrauchs sind jedoch eklatante Unterschiede vorhanden. Tabelle 4-1 zeigt, wie mit steigender Eingabe n die Laufzeit (und schlussendlich die Effizienz des Algorithmus) unterschiedlich schnell bei alltäglichen Notationen ansteigt.

Anmerkung: Eine Operation dauert 1 Nanosekunde

n	$O(\log_2(n))$		$O(n)$		$O(n)^2$		$O(2)^n$	
10	$3 \cdot 10^{-9}$	s	$1 \cdot 10^{-8}$	s	$1 \cdot 10^{-7}$	s	$1 \cdot 10^{-6}$	s
100	$7 \cdot 10^{-9}$	s	$1 \cdot 10^{-7}$	s	$1 \cdot 10^{-5}$	s	10^{13}	Jahre
1000	$1 \cdot 10^{-8}$	s	$1 \cdot 10^{-6}$	s	$1 \cdot 10^{-3}$	s	10^{284}	Jahre
10000	$1,3 \cdot 10^{-8}$	s	$1 \cdot 10^{-5}$	s	$1 \cdot 10^{-1}$	s	10^{3002}	Jahre
100000	$1,7 \cdot 10^{-8}$	s	$1 \cdot 10^{-4}$	s	10	s	10^{30095}	Jahre

Tabelle 4-1 Ausführungszeiten von Algorithmen [19]

Aus dieser Tabelle geht hervor, dass die Laufzeit für den exponentiellen Algorithmus der Komplexität von ($O(2^n)$) selbst bei geringen Eingabemengen hoch ist, weswegen dieser Algorithmus praktisch gesehen undurchführbar ist. Aus diesem Grund wird, wenn möglich, nach einem Algorithmus gesucht, dessen Laufzeit nicht größer ist als eine polynomiale Wachstumsfunktion ($O(n^c)$ mit $c = \text{konstant}$) hat, denn diese gelten als durchführbar.

Tatsächlich gelten nicht alle davon als durchführbar wenn die Komplexität zum Beispiel im schlechtesten Fall $O(n^{100})$ ist, weil diese bei steigenden n eine sehr lange Laufzeit haben. Die Grenze zwischen durchführbaren und nicht durchführbaren Algorithmen wird zwischen polynomialer und exponentieller Wachstumsraten gezogen. Grund hierfür ist bis dato das Fehlen eines besseren Abgrenzungskriteriums [15] [19] [20].

Weitere theoretische Beschreibungen über Notationen sind in [15] , Seite 45 ff zu finden.

4.4. Parallelität

Viele Jahre wurden die Taktfrequenzen und Effizienz der Prozessoren ständig erhöht, was zu einem linearen Anstieg der Rechenleistung führte. Ein Manko ist, dass die verbrauchte Leistung im Quadrat mit der Taktfrequenz steigt, weshalb es obere thermische Schranken gibt, da das Abführen der entstehenden Verlustwärme physikalischen Grenzen unterworfen ist. So wurden in Laufe der Zeit Mehrkernprozessoren, sowie Serveranlagen, die mitunter mehrere tausend Prozessoren enthalten, entwickelt. Um bei diesen Parallelrechnern die volle Rechenkapazität zu nutzen, mussten Multithreading-Algorithmen entwickelt werden. Dazu wurden serielle Algorithmen erweitert, die dann parallel abgearbeitet werden können, d.h. es können mehrere Maschinenbefehle gleichzeitig abgearbeitet werden. Jedem Thread ist ein eigener Befehlszähler zugeordnet, wodurch der Maschinencode unabhängig ausgeführt werden kann. Jedoch greifen die Threads auf einen gemeinsamen Speicher zu, welcher untereinander geteilt wird (diese Steuerung obliegt schlussendlich dem Prozessor). Das Betriebssystem lädt einen Thread zur Ausführung und verdrängt ihn, wenn ein anderer Thread ausgeführt werden muss [15] [23].

Es gibt sowohl statisches als auch dynamisches Multithreading. Beim Statischen ist es sehr schwierig, einen Algorithmus so zu programmieren, dass alle Teilrechner immer gleichmäßig ausgelastet sind. Aus dieser Sachlage heraus wurden spezielle Softwareschichten entwickelt, welche die Ressourcen für paralleles rechnen planen und verwalten. Zusätzlich wurden vollwertige Programmiersprachen für paralleles Rechnen entwickelt [15].

Beim dynamischen Multithreading muss sich der Entwickler keine Gedanken darüber machen, wie er vernünftig die Lastverteilung macht, sondern die Entwicklungsplattform enthält einen Scheduler, welcher diese Berechnung automatisch durchführt. Es gibt vielfältige Vorteile, wie z.B. dass der Programmierer seinen sequentiellen (Single-Threaded) Algorithmus sehr leicht durch Verwendung spezieller Schlüsselwörter erweitern und er sich wichtigeren Aufgaben widmen kann. Des Weiteren wird auch das Teile-und-Beherrsche-Paradigma² auf natürliche Art und Weise durchgeführt [15].

Weitere Informationen findet man in [15], Kapitel 27, welches sich ganz diesem Thema widmet.

² Dieses Thema wird in [13], Kapitel 4 ausführlichst behandelt.

4.5. Algorithmen als Technologie

Schlussendlich muss man Algorithmen als Technologie verstehen. Die Leistung eines Algorithmus hängt gleichermaßen von der Hardware sowie der Effizienz eines Algorithmus ab. Es wurde jedoch festgestellt, dass ein effizienter Algorithmus selbst auf langsamen Systemen rechenintensive Aufgabenstellungen schnell und ökonomisch berechnen kann [15].

Am Ende kommt die Frage auf, ob Algorithmen heutzutage wirklich so wichtig sind. Die Antwort lautet ja, da sie in nahezu allen Anwendungen und Programmen vorkommen. Meistens sind diese nicht so komplex, aber meist haben sie doch ein gewisses Maß an algorithmischem Inhalt. Es gibt unzählige Beispiele. So fängt es bei der Hardwareentwicklung an, weil Platinen automatisch mittels Algorithmen designt werden. Oder die grafische Oberfläche, auch auf dieser laufen im Hintergrund Algorithmen, die viele grafische Elemente steuern. Oder die Umsetzung einer Anwendung von einer (höheren) Programmiersprache in Maschinencode, den auch Compiler oder Interpreter werden von Algorithmen gesteuert. Oder Mikrochips, deren logische Gatter eigentlich nur physikalische Algorithmen sind. Daraus kann man nur eine Antwort schließen: Algorithmen sind in der (rechnerunterstützten) Technik eine zentrale und sehr wichtige Technologie [15].

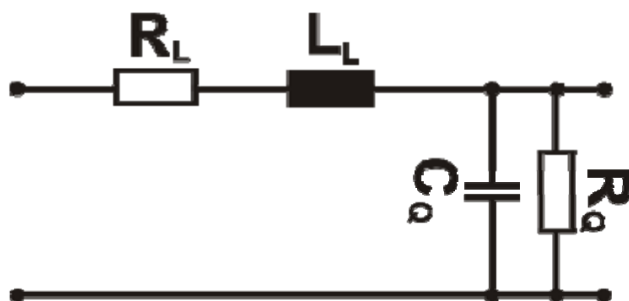
5 BERECHNUNG UND METHODIK

5.1. Berechnung der induzierten Spannungen

Um den induzierten Spannungsverlauf entlang induktiv beeinflussten Rohrleitungen zu berechnen, sind mehrere Schritte notwendig. Zuerst muss die induzierte Spannung pro Längeneinheit (Abschnittseinheit) berechnet werden.

Die allgemeinste Form lautet: $\underline{U}_J = \underline{Z}_g \cdot \ell \cdot \underline{I}$. Während die Länge des Parallellaufes ℓ und der beeinflussende Strom \underline{I} gegeben sind, ist die Berechnung der Koppelimpedanz \underline{Z}_g wesentlich aufwändiger. Sie hängt von der geometrischen Lage der Leiter zueinander, dem spezifischen Erdwiderstand und der Systemfrequenz des beeinflussenden Systems ab und wird mit Hilfe unendlicher Reihen nach der Methode von Carson und Pollaczek berechnet. Diese aufwändige Berechnungsmethode findet man u.a. in [24] [25] und [26]. Zur Berücksichtigung der Wirkung fremder leitfähiger Teile (Erdseile, Erdungsanlagen, Kabel, Schienen, ...) werden Reduktionsfaktoren verwendet. Die Formel erweitert sich damit um den Faktor r auf $\underline{U}_J = \underline{Z}_g \cdot \ell \cdot \underline{I} \cdot r$. [1].

Bei der Berechnung der Leitungsimpedanzen ist zu berücksichtigen, dass es sich meist nicht um einen Leiter, sondern um mehrere miteinander gekoppelte Leiterschleifen handelt. So müssen auch zusätzliche Queradmittanzen berücksichtigt werden. Deshalb werden im nächsten Schritt die längenbezogenen Rohrleitungsparameter in Längsrichtung (R_L , L_L) und in Querrichtung (R_Q , C_Q) nach den Formeln von Michailow und Rasumov berechnet. [27] [28] Das elektrische Verhalten einer erdverlegten Rohrleitung mit Rückleitung kann durch folgenden Vierpol beschrieben werden [1].



- R_R : Ohmsche Widerstandsbelag, Erdwiderstandsbelag
- L_L : Innere Reaktanzbelag, Selbstreaktanzbelag
- R_Q : Ohmsche Ableitungsbelag
- C_Q : Kapazitive Ableitungsbelag

Abbildung 5-1: Elektrisches Ersatzschaltbild einer Rohrleitung [1]

Aus $Z_L = R_L \cdot L_L$ und $Y_L = R_Q \cdot C_Q$ berechnet man den Längsimpedanzbelag Z_L und Queradmittanzbelag Y_L . Die induzierende Spannung (beeinflussendes System) wirkt auf die Längsimpedanz, welche einen induzierenden Strom erzeugt. Unter Annahme symmetrischer Bedingungen für beide Beläge sowie der Voraussetzung, dass innerhalb gewisser Abschnitte die Beläge konstant und damit die Rohrleitung homogen ist, kann eine äquivalente Ersatzschaltung für eine Rohrleitung ermittelt werden, welche unter Abbildung 5-2 dargestellt ist. Dazu werden als Längsimpedanz der mit der Länge ℓ des Rohrabschnittes multiplizierter Längsimpedanzbelag und als Queradmittanz der mit ℓ multiplizierte Queradmittanzbelag verwendet. In nachfolgender Abbildung wird nur der mittlere Teil von einem beeinflussenden System induktiv beeinflusst und ein Strom induziert [1].

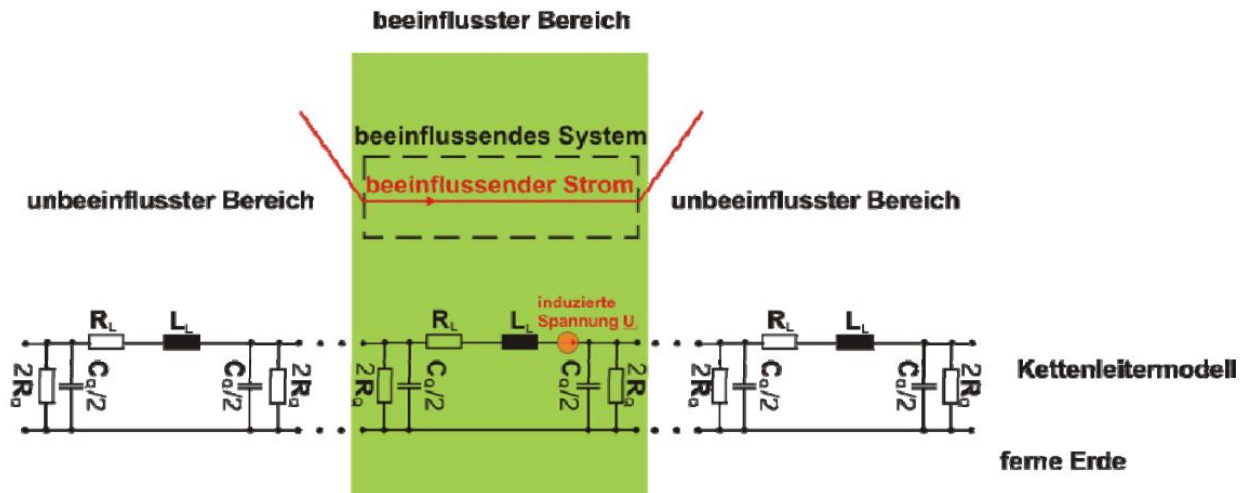


Abbildung 5-2: Kettenleiter-Ersatzschaltbild einer induktiv beeinflussten Rohrleitung [1]

Im letzten Schritt wird, wenn alle Längsimpedanzen und Queradmittanzen der Rohrleitung bestimmt sind, eine Knotenpunktadmittanzmatrix gebildet. Über diese Matrix und der eingepprägten induzierten Längsspannung können nun die Knotenströme berechnet werden, welche voneinander wertemäßig abhängig sind. Nun kann an jedem Knotenpunkt mit der dazugehörigen Queradmittanz und dem dort fließenden Knotenstrom die induzierte Beeinflussungsspannung der Rohrleitung an diesem Punkt berechnet werden. Werden die Spannungen der gesamten Leitung betrachtet, bekommt man einen Rohrleitungspotentialverlauf [1].

Wenn Erdungsanlagen eingebaut werden, werden diese bereits bei der Knotenadmittanzmatrix berücksichtigt, wodurch sich alle Knotenströme innerhalb eines Abschnittes (von Isolierkupplung zu Isolierkupplung) ändern.

Im Zuge der Berechnung wird das Rohrpotential der einzelnen Knoten auf der y-Achse dargestellt und die Länge der betrachteten Rohrleitung auf der x-Achse aufgetragen.

5.2. Problemstellung

Wurden keine spannungsreduzierenden Maßnahmen durchgeführt und ist die Berechnung vom Rohrleitungspotentialverlauf über die gesamte Leitung verfügbar, resultiert daraus ein Spannungsverlauf entlang der Rohrleitung gegen das Bezugspotential. Darin ist ersichtlich, ob die maximale Spannung höher als die geforderten Spannungen der Richtlinien TE30 bzw. CEN/TS 15280 ist. In der Abbildung 5-3 ist zu erkennen, dass das maximale Potential höher liegt als das von den Richtlinien geforderte.

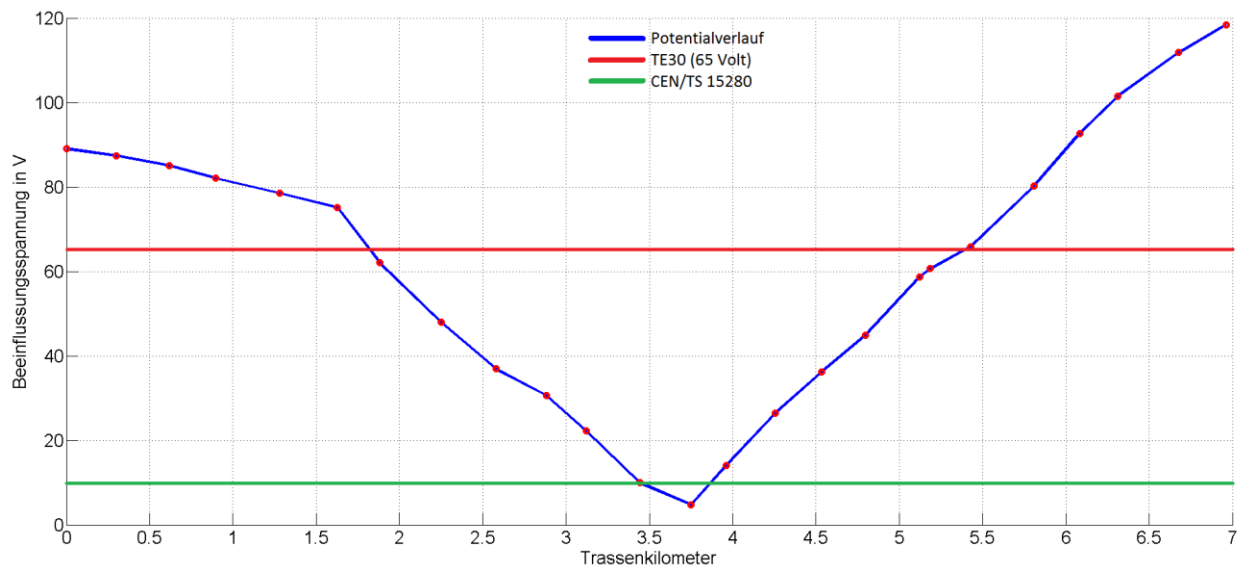


Abbildung 5-3: Rohrleitungspotentialverlauf ohne reduzierende Maßnahmen

Um den Rohrleitungspotentialverlauf auf Werte zu bringen, welche die Richtlinien oder die vom Benutzer geforderte maximale Grenzspannung erfüllt, müssen geeignete Maßnahmen getroffen werden. Diese sind Isolierkupplungen und Erdungsanlagen. Bei bestehenden Systemen werden aus früher genannten Gründen zur Reduzierung der eingekoppelten Spannungen meist Erdungsanlagen verwendet.

Damit Erdungsanlagen ein effektive Maßnahme darstellen, müssen sowohl die Bedingung der Potentialreduzierung erfüllt als auch die technisch-wirtschaftliche Optimierung, aufgrund eventueller Budgetbegrenzungen bei Projekten, beachtet werden.

Für die Optimierung des Beispiels in Abbildung 5-3, muss eine geeignete Verortung der Erdungsanlagen durchgeführt werden. Die Schwierigkeit liegt nicht nur darin, an der richtigen Position eine Erdungsanlage zu platzieren, sondern auch ihren Widerstandswert so zu wählen, dass die Potentialreduzierung groß genug ist (vgl. Abbildung 3-8), aber die Kosten trotzdem in einem akzeptablen Rahmen bleiben.

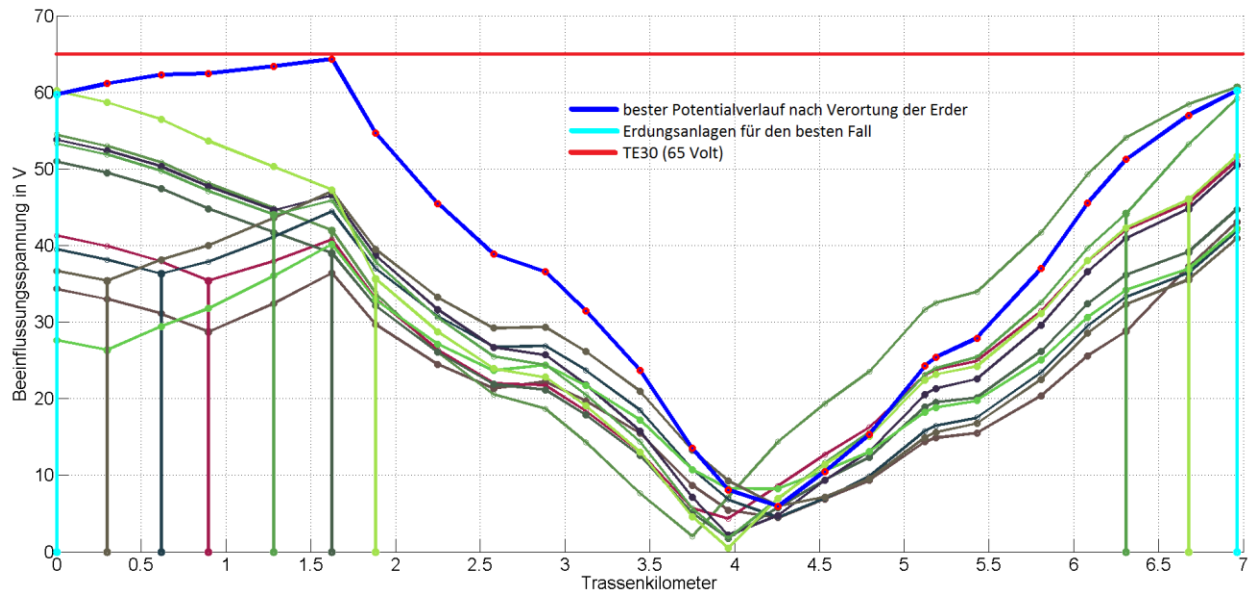


Abbildung 5-4: Rohrleitungspotentialverläufe mit unterschiedlicher Verortung von Erdungsanlagen

In Abbildung 5-4 ist die Problematik zu erkennen, dass es verschiedene Möglichkeiten gibt, wie und wo Erdungsanlagen platziert werden können, um unter der maximalen Spannung von 65 Volt (TE30 – rote waagrechte Linie) zu bleiben. Jede der verschiedenfarbigen Linien (außer rot, blau und hellblau) zeigt einen anderen Potentialverlauf. Die gleichfarbigen senkrechten Linien zeigen die Position von Erdungsanlagen an. Die meisten davon befinden sich mehrmals auf der gleichen Position, weshalb diese von Matlab überzeichnet werden. Besonders auffällig ist dies im hinteren Teil, wohingegen im vorderen Teil mehrere mögliche Positionen für Erdungsanlagen existieren. Jedoch kann man mit diesem 2D-Plot nicht erkennen, dass die Widerstandswerte der Erder verschieden groß sind, d.h. die Kosten der Verläufe variieren.

Die optimale Lösung für den Rohrleitungspotentialverlauf ist als blaue Kurve dargestellt. Diese erfüllt sowohl die TE30 als auch die technisch-wirtschaftliche Optimierung, d.h. es gibt keinen Kurvenverlauf, der kostengünstiger zu realisieren ist. Hierbei werden zwei Erdungsanlagen (hellblaue senkrechte Linien) verwendet, sowohl an der ersten als auch an der letzten Position.

Da die manuelle Untersuchung dieses Problems sehr zeitaufwändig ist, scheint es sinnvoll und naheliegend, diese Berechnung von Algorithmen durchführen zu lassen. Die unterschiedlichen Algorithmen haben ihre jeweiligen Vor- und Nachteile. Diese sind im Rahmen bestimmter realistischer Aufgabenstellungen zu überprüfen, um herauszufinden welcher Algorithmus in welcher Situation der am besten geeignete ist. Da die kritische Komponente die Laufzeit eines Algorithmus ist (Ressourcenverbrauch), wird diese besonders sorgfältig behandelt und untersucht.

5.3. Verwendete Arbeitsutensilien, Messung der Laufzeiten

Als Programmierumgebung wird Matlab verwendet, da diese Sprache mehrere Vorteile bei wenigen Nachteilen vereint. Zu den Vorteilen zählen ein meist unkomplizierter Sprachstil, der nach einer kurzen Eingewöhnungszeit bei bereits vorhandenen Programmierkenntnissen verwendet werden kann, viele „Mikroskripte“, also vorgefertigte Unterprogramme auf die man einfach und schnell zugreifen kann (wie z.B. Sortieren, Maximum aus einem Array herausfiltern oder String-Manipulationen), eine leicht zu erstellende und implementierende grafische Oberfläche sowie vielfältige Möglichkeiten, um mit unterschiedlichen Datentypen umzugehen. Letztgenannter Punkt ist auch gleichzeitig ein Nachteil, da manche Ideen nur kompliziert umsetzbar sind. Ein weiterer möglicher Nachteil ist die Voraussetzung, dass man Matlab oder zumindest die Matlab Runtime Library nutzen muss, welche immer im Hintergrund als Interpreter läuft (vergleichbar mit Java Runtime, tatsächlich verwendet Matlab in vielen Bereichen die Programmiersprache Java). Dadurch besitzt Matlab längere Rechenzeiten, da Matlab im Normalfall die gleiche Prioritätsausführung wie alle anderen Programme hat und der Interpreter erst den Quellcode für den Prozessor übersetzen muss.

Folgende Softwareumgebungen wurden während der Quellcodeerstellung verwendet:

- Matlab: 7.9.0 (R2009b) , 7.10.0 (R2010a)
- Windows: WinXP SP2 32bit (Professional), Win7 64bit (Professional und Ultimate)

Da die verwendeten Algorithmen nicht nur auf ihr Ergebnis, sondern auch auf ihre Laufzeit hin analysiert werden, ist es wichtig, dass die Algorithmen mehrmals ausgeführt werden. In der vorliegenden Aufgabenstellung wird der Algorithmus mindestens fünfmal aufgerufen um praxisnahe Werte zu erreichen. Die Laufzeit wird von dem Punkt an gemessen, bei dem die Berechnungssimulation startet, wird aber gestoppt, bevor das Ergebnis in Matlab angezeigt wird, da ansonsten die Messergebnisse verfälscht werden.

Um diese Laufzeiten vergleichbar zu machen, wurden alle Laufzeiten am folgenden Rechner aufgenommen:

- Betriebssystem: Windows 7 Professional 64bit
- Matlab: 7.9.0 (R2009b)
- CPU: Intel E8400 @ 3Ghz @ 2 Threads (2 CPU-Kerne)
- RAM: 4 GB DDR2

Ab Matlab Version R2009b gibt es eine automatische Multithreading-Unterstützung, wodurch eine durchschnittliche Auslastung von 70% je CPU-Kern bei den Berechnungen erreicht, bei mehreren Kernen sollte also die Laufzeit geringer werden.

5.4. Kostenbewertung von Wechselstromerdungsanlagen

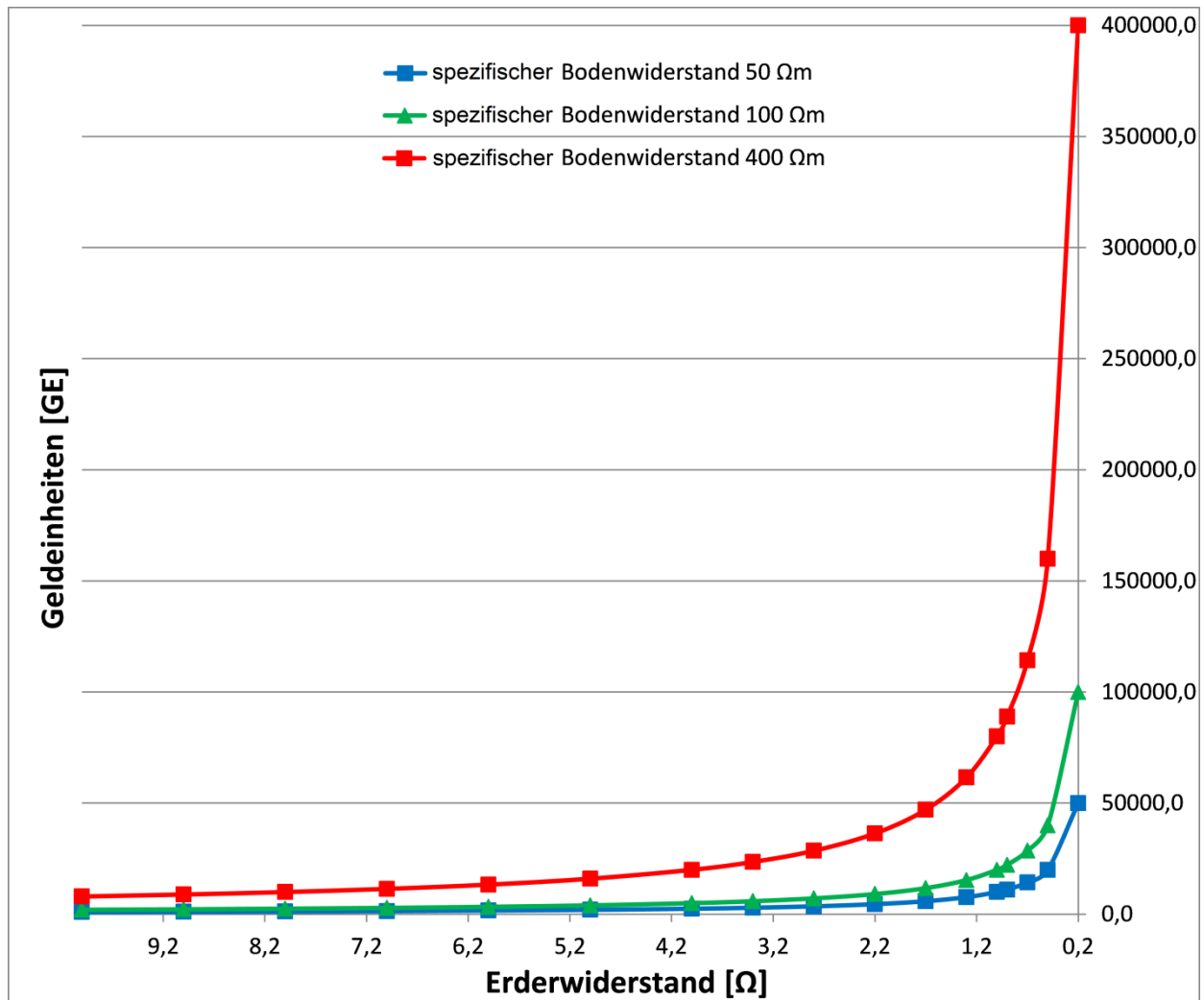


Abbildung 5-5: Kosten von Wechselstromerdungsanlagen

Abbildung 5-5 zeigt die Kostenbewertungsfunktion, wie Erdungsanlagen abhängig von ihren Erderwiderstandswert bewertet werden. Diese entspricht nicht den wahren Kosten für die Errichtung einer Anlage, aber manche Algorithmen können damit bewerten, wie schwierig eine Anlage zu realisieren ist. Wie bereits ab Seite 11 gezeigt wurde, wird mit sinkendem Erderwiderstand die räumliche Ausdehnung der Erdungsanlage zunehmend größer. Dies bedeutet steigende Kosten, welche mit folgender Formel berücksichtigt werden:

$$Kosten [GE] = 20000 \cdot \frac{0,01 \cdot \text{spez. Erdwiderstand}}{\text{Erderwiderstand}}$$

Diese Kosten werden für jede Erdungsanlage ausgerechnet und summiert, und jene Kombination aus einer oder mehreren Erdungsanlagen, welche die geringsten Kosten verursacht, wird als optimale Lösung präsentiert.

5.5. Verwendete Programmoberfläche

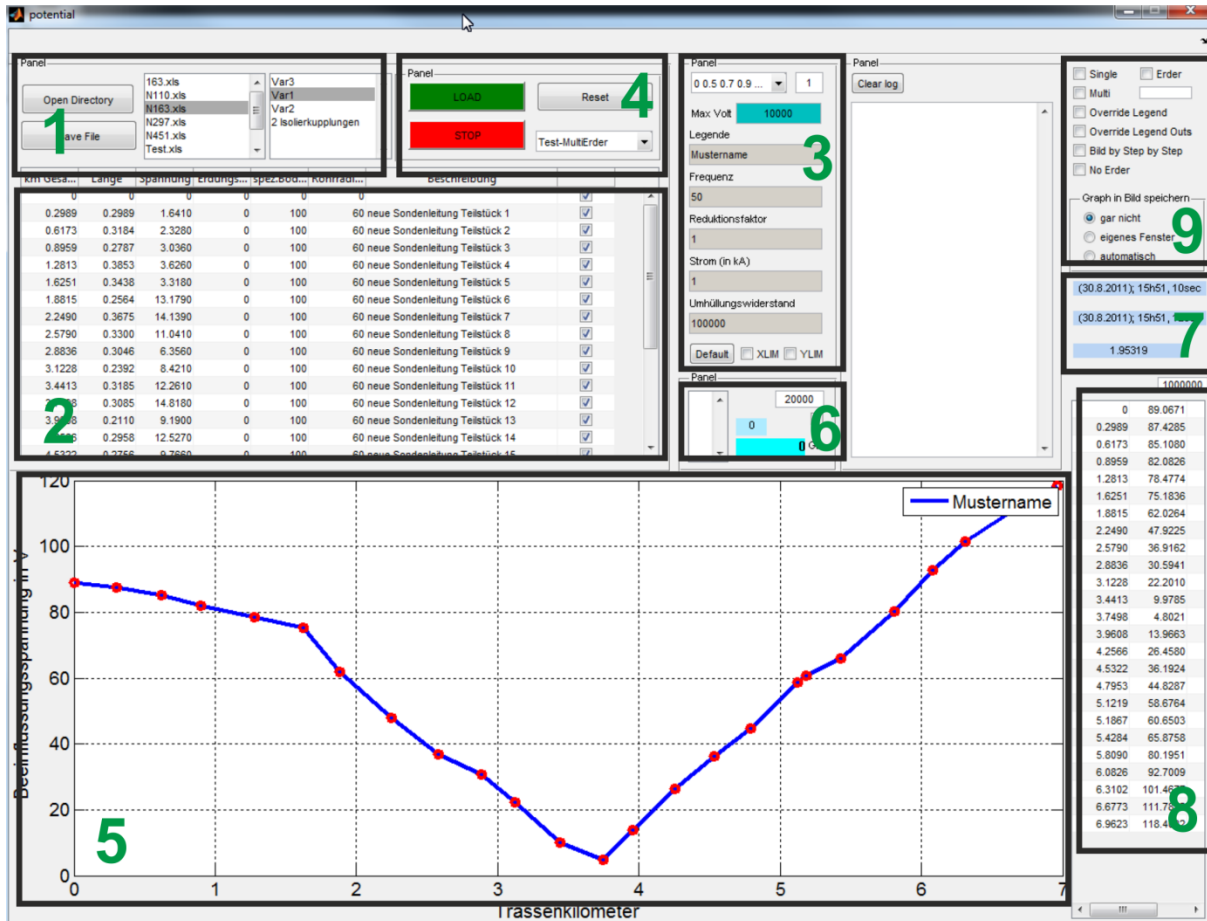


Abbildung 5-6: Verwendete Programmoberfläche

In Abbildung 5-6 ist die fertige grafische Programmoberfläche zu sehen. Es wurde dabei darauf geachtet, sowohl eine einfache Bedienung zu ermöglichen als auch flexibel die Daten zu bearbeiten. Die einzelnen Module der Oberfläche werden nachfolgend so beschrieben, wie sie auch verwendet werden (außer Punkt 9):

- 1) In diesem Teil kann man sehr bequem fertige Excel-Dateien öffnen, ohne manuelle Eingaben erledigen zu müssen. Es ist auch möglich, in einer Datei verschiedene Arbeitsblätter zu haben, um unterschiedliche Varianten eines Rohrleitungsproblems zu erhalten.
- 2) Nachdem ein Arbeitsblatt einer Datei geöffnet worden ist, werden, nach erfolgter Kontrolle der Gültigkeit eines Datensatzes, die Daten in diese Tabelle hineingeladen. Damit bekommt man einen schnellen Überblick über die geladenen Daten. Hier hat man auch die Möglichkeit, manuell Erdungsanlagen einzufügen (vierte Spalte) bzw. Bereiche zu markieren, in denen bei einer Berechnungssimulation Erdungsanlagen eingebaut werden dürfen (letzte Spalte, in diesem Beispiel sind alle Bereiche erlaubt).

- 3) Hier können spezifische Daten eingegeben werden, mit welchen simuliert werden soll. Darunter gehört die Systemfrequenz des beeinflussenden Systems, eventuell vorhandene Reduktionsfaktoren, der (maximale) Strom im beeinflussenden System und der Umhüllungswiderstand (Isolationswiderstand) des beeinflussten Systems. Ganz oben kann aus einer Liste ausgewählt werden, welche Widerstandswerte für Erder bei der Simulation verwendet werden dürfen. Rechts davon findet sich ein kleines Feld, in welches der Vorgabewiderstandswert für den Experten-Algorithmus eingetragen wird. Im blauen Feld kann das maximale Rohrleitungspotential eingetragen werden, auf welches der Algorithmus bei der Berechnungssimulation optimiert werden muss.

Sollen diese Daten noch nicht eingetragen werden, können entweder mit dem Button „Default“ oder mit dem Button „Load“ (Punkt 4) die Standardwerte eingetragen werden.

- 4) Hier wird die Berechnung gestartet oder falls nötig, auch abgebrochen. Des Weiteren kann der Datensatz zurückgesetzt werden. Wichtig ist aber, dass hier eingestellt werden kann, nach welcher Methode optimiert werden soll.
- 5) In diesem Graphen wird der Rohrleitungspotentialverlauf angezeigt. Falls Erdungsanlagen bereits vorhanden sind oder durch einen Algorithmus eingefügt werden, können diese hier dargestellt werden.
- 6) Damit einhergehend werden sofort die Kosten für alle Erdungsanlagen berechnet und ausgegeben. Eventuell bereits vorhandene Erdungsanlagen, welche schon in die Rohrleitung eingebaut sind, werden bei der Berechnung der Kosten nicht berücksichtigt.
- 7) Um eine zuverlässige Laufzeitanalyse zu ermöglichen, wird diese direkt in Matlab mit speziellen Befehlen gemessen und der Übersichtbarkeit wegen direkt in der graphischen Oberfläche dargestellt.
- 8) In dieser Tabelle werden die Ergebnisse nochmals in Werten aufgezeigt. Die erste Spalte zeigt die Trassenkilometer an, die zweite Spalte das an diesem Punkt herrschende Potential und die in diesem Bild nicht sichtbare dritte Spalte die Position und Wert der Erdungsanlage.
- 9) Dieser Punkt beschreibt einige Einstellmöglichkeiten, welche vorwiegend die graphische Aufbereitung behandeln. Es besteht beispielsweise die Möglichkeit, mit der Checkbox „Single“ den Optimierungsverlauf für eine Rohrleitung ohne Isolierkupplung zu verfolgen und eventuelle Rückschüsse darauf zu machen. Mit der Checkbox „No Erder“ können die Erdungsanlagen im Graphen ausgeblendet werden, um einen besseren Überblick zu bekommen.
- Wichtig sind die unscheinbare Checkbox „Erder“ (rechts oben) sowie das darunterliegende Eingabefeld, damit werden die Widerstandswerte, welche in Punkt 3 aus der Liste ausgesucht werden, übergangen. Folglich verwenden die Algorithmen den Widerstandswert des Eingabefeldes.

5.6. Optimierungsbedingungen und Analyse Kriterien

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erklärt wurde, ist es das Ziel, einen Algorithmus zu entwickeln, welcher sowohl ein schnelles als auch ein optimales Ergebnis liefert, ohne dass dieser zu viel Systemressourcen verbraucht. Als Ziel wurde festgestellt, dass eine optimale Verortung von Erdungsanlagen nötig ist. Einerseits, um das Rohrleitungspotential unter einer vorgegebenen maximalen Spannung zu bringen. Andererseits, um die Widerstandswerte der Erdungsanlagen groß genug für die Minimierung der räumlichen Ausdehnung zu wählen und trotzdem das Ziel der Potentialreduzierung zu erreichen.

Primärziel: Den Spannungslevel mit Erdungsanlagen optimieren, damit die vorgegebene Spannung nicht überschritten wird

Sekundärziel: Widerstandswerte und Verortung so wählen, dass die kostenoptimierte Lösung entsteht

Um sinnvolle Vergleichswerte zwischen den unterschiedlichen Algorithmen zu bekommen, ist die Auswertung aller Widerstandswerte nicht zielführend, sondern folgende Widerstandswertreihe wird verwendet: [4 ; 3,4 ; 2,8 ; 2,2 ; 1,7 ; 1,3 ; 1 ; 0,9 ; 0,7 ; 0,5] Ω .

Auch werden die Algorithmen daraufhin getestet, wie sie mit nur einem möglichen Widerstandswert optimieren können, dazu wird der Wert von 1 Ω genommen, da dieser praxisrelevant und nicht zu kostenintensiv ist.

Für den Vergleich der Algorithmen werden mehrere Kriterien verwendet, um die Frage zu beantworten, welcher für welchen Fall der Beste ist. Dazu wird die kritische Komponente der Laufzeit gemessen (siehe 5.3). Zusätzlich wird auch die Anzahl der verwendeten Erdungsanlagen sowie deren Position und Widerstandswert analysiert. Aus der Anzahl der Anlagen und dem dazugehörige Widerstandswert werden die Gesamtkosten berechnet. Der Speicherbedarf wird nicht untersucht, da keiner der Algorithmen viele Zwischendaten speichert, und daher diese Ressource kaum bis gar nicht benötigt wird.

Es werden drei unterschiedliche Algorithmen verwendet:

- Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus: Dieser soll immer das beste Ergebnis liefern, egal wie lange er dafür braucht (Ergebnis konstant, Laufzeit flexibel). Um die Laufzeit zu verkürzen, wird auch der optionale Datenfilter verwendet. Damit werden die Knotenpunkte, wo die niedrigsten Spannungen auftreten, herausgefiltert.
- Las-Vegas-Algorithmus: Ist ein randombasierender Algorithmus, sowohl Ergebnis wie Laufzeit ist flexibel.
- Experten-Algorithmus: basiert auf Expertenwissen des Instituts für Elektrische Anlagen und soll die Vorgehensweise nachahmen, das Ergebnis soll konstant sein, die Laufzeit nahezu konstant.

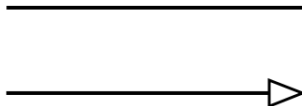
5.7. Eine kurze Einführung in Flussdiagramme

Ein Flussdiagramm, oder auch Programmablaufplan, ist eine grafische Umsetzung eines Algorithmus in einem Programm und beschreibt die Folge von Operationen zur Lösung einer Aufgabe. Es bedeutet, dass unabhängig von der verwendeten Programmiersprache verschiedene Aufgaben wie Prozesse, Operatoren, Verzweigungen oder Tätigkeiten verständlich dargestellt werden.

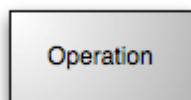
Sowohl die Form der Symbole als auch was sie bedeuten, ist in DIN 66001 beschrieben. Aber in der folgenden Übersicht werden sie kurz aufgeführt, um sie im Bedarfsfall schnell nachschlagen zu können.



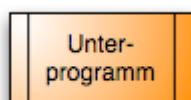
Mit diesem Symbol wird eine Aufgabe gestartet oder gestoppt. Es ist auch möglich, verschiedene Start- oder Stoppsymbole zu verwenden.



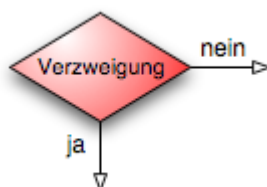
Mit diesem Element wird die Verbindung zum nächsten Element hergestellt. Die Pfeilrichtung zeigt, wie sich der Algorithmus durch das Flussdiagramm bewegt.



Dieses Symbol stellt die Operation, also die Ausführung von Befehlen, wie z.B. ein Array zu modifizieren oder Sortieren von Zahlen, dar.



Wie der Symbolname schon zeigt, wird damit ein Unterprogramm aufgerufen, oder es ruft sich der beschriebene Algorithmus selbst auf (rekursiver Aufruf).



Verzweigungen definieren stets Alternativen in der Abarbeitung. Dabei muss immer eine Entscheidung getroffen werden, z.B. wenn eine Zahl größer als ein vorgegebener Wert ist, dann wird der Ja-Zweig ausgeführt, ansonsten der Nein-Zweig (if-Bedingung). Damit können auch sich wiederholende Bereiche beschrieben werden (for-Schleife).

6 BESCHREIBUNG DER VERWENDETEN ALGORITHMEN

6.1. Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus (VSOA)

6.1.1. Einführung

Um für die Aufgabenstellung ein genaues und optimales Ergebnis zu bekommen, müssen alle möglichen Kombinationen getestet werden. Das bedeutet, dass alle möglichen Positionen für Erdungselemente berücksichtigt werden müssen, nicht nur im Bereich der Spitzenwerte. Dadurch, dass der Algorithmus die Widerstandswerte auch mit einer Widerstandsreihe (siehe 5.6) untersucht und diese an den verschiedenen Positionen variiert, müssen alle möglichen Kombinationen bis zum Erreichen des Primärziels durchgetestet werden.

Alleine durch diese Tatsache ergibt sich eine deterministische Maschine, da immer die gleichen Anweisungen hintereinander Abfolgen und alle Zwischenschritte bei der gleichen Eingabe identisch sind. Dadurch ergibt sich aber eine exponentielle Laufzeit, da wie bereits erwähnt, alle Möglichkeiten getestet werden. Diese Laufzeit beträgt dadurch $O(c^n)$, während c die Anzahl der Widerstandswerte in der Widerstandsreihe (zehn) und n die Anzahl der verwendeten Erdungsanlagen sind.

Wenn es nun 7 verschiedene Knotenpunkte gibt, auf denen Erdungsanlagen eingebunden werden können, wird die Laufzeit vollständig beschrieben durch: $O((7 \cdot c)^n)$, diese Notation ist ein ungefähres Ergebnis. Damit wird in Tabelle 6-1 berechnet, wie viele mögliche Kombinationen der Algorithmus zu berechnen hat, wenn a) die oben genannte Widerstandsreihe mit 10 Möglichkeiten oder b) ein fixierter Widerstandswert von 1Ω verwendet wird.

	Widerstandsreihe	Fixierte Widerstandswert
1 Erder	70	7
2 Erder	4.900	49
3 Erder	343.000	343
4 Erder	24.010.000	2401
5 Erder	1.680.700.000	16807

Tabelle 6-1: Unterschied zwischen einem Widerstandwert und Widerstandsreihe

Tabelle 6-1 zeigt bei der Verwendung von einem fixen Widerstandswert, dass es deutlich weniger Kombinationen gibt, die berechnet werden müssen.

6.1.2. Flussdiagramm – Variation der Erdungsanlagen

Position	1	2	3	4	5	6	7	Position	1	2	3	4	5	6	7
Mögl. 1	4	0	0	0	0	0	0	Mögl. 56	4	0,5	0	0	0	0	0
Mögl. 2	4	4	0	0	0	0	0	Mögl. 57	4	0	0,5	0	0	0	0
Mögl. 3	4	0	4	0	0	0	0	Mögl. 58	4	0	0	0,5	0	0	0
Mögl. 4	4	0	0	4	0	0	0	Mögl. 59	4	0	0	0	0,5	0	0
Mögl. 5	4	0	0	0	4	0	0	Mögl. 60	4	0	0	0	0	0,5	0
Mögl. 6	4	0	0	0	0	4	0	Mögl. 61	4	0	0	0	0	0	0,5
Mögl. 7	4	0	0	0	0	0	4	Mögl. 62	0	4	0	0	0	0	0
Mögl. 8	4	3,4	0	0	0	0	0	Mögl. 63	0	4	4	0	0	0	0
Mögl. 9	4	0	3,4	0	0	0	0	Mögl. 64	0	4	0	4	0	0	0
Mögl. 10	4	0	0	3,4	0	0	0	Mögl. 65	0	4	0	0	4	0	0
Mögl. 11	4	0	0	0	3,4	0	0	Mögl. 66	0	4	0	0	0	4	0
Mögl. 12	4	0	0	0	0	3,4	0	Mögl. 67	0	4	0	0	0	0	4
Mögl. 13	4	0	0	0	0	0	3,4	Mögl. 68	3,4	4	0	0	0	0	0

Tabelle 6-2: Ausschnitt aus der Erdungselemente-Setzreihenfolge

Tabelle 6-2 zeigt einen Ausschnitt aus den Variationen der Verortung mit zwei Erdungsanlagen, wenn zusätzlich der Widerstandswert der Anlagen variiert wird. Die erste Reihe zeigt die Positionsmöglichkeiten an der Leitung für Erdungsanlagen an, wobei Position 1 der Anfang und Position 7 das Ende der Leitung ist. Außerdem wird die Tabelle in zwei Teile geteilt: der linke Bereich zeigt die Variationen, mit denen der Algorithmus startet (Möglichkeit 1 bis 13), der rechte Teil zeigt Variationen von Erdungsanlagen während der Berechnung (Möglichkeit 56 bis 68). Für die Widerstandswerte wird die Reihe [4 ; 3,4 ; 2,8 ; 2,2 ; 1,7 ; 1,3 ; 1 ; 0,9 ; 0,7 ; 0,5] Ω verwendet, im Allgemeinen funktioniert dieser Algorithmus auch mit nur einem Wert, dann entfällt die Variation des Erdungsanlagenwiderstandwertes.

So ist zu sehen, dass am Anfang der Widerstandswert der ersten Erdungsanlage auf die erste Position mit dem höchsten Wert gesetzt wird, und die zweite Erdungsanlage sowohl vom Wert als auch von der Position variiert wird. Wenn nun bei der zweiten Erdungsanlage alle Möglichkeiten erschöpft sind, befindet sich der Algorithmus bei der Möglichkeit 61. Dadurch wird im nächsten Schritt (Mögl. 62) die erste Erdungsanlage auf die nächste Position bei gleichem Widerstandswert gesetzt, und die zweite Erdungsanlage wird wiederum variiert.

Wenn nun die erste Erdungsanlage die letzte Position erreicht hat und die zweite Erdungsanlage sowohl von Position als auch Wert komplett durchvariiert ist, wird die erste Erdungsanlage auf die erste Position mit dem nächstniedrigeren Widerstandswert (3,4) gesetzt, und es werden alle Schritte von oben wiederholt. Der Algorithmus stoppt, wenn alle möglichen Positionen durchgetestet worden sind.

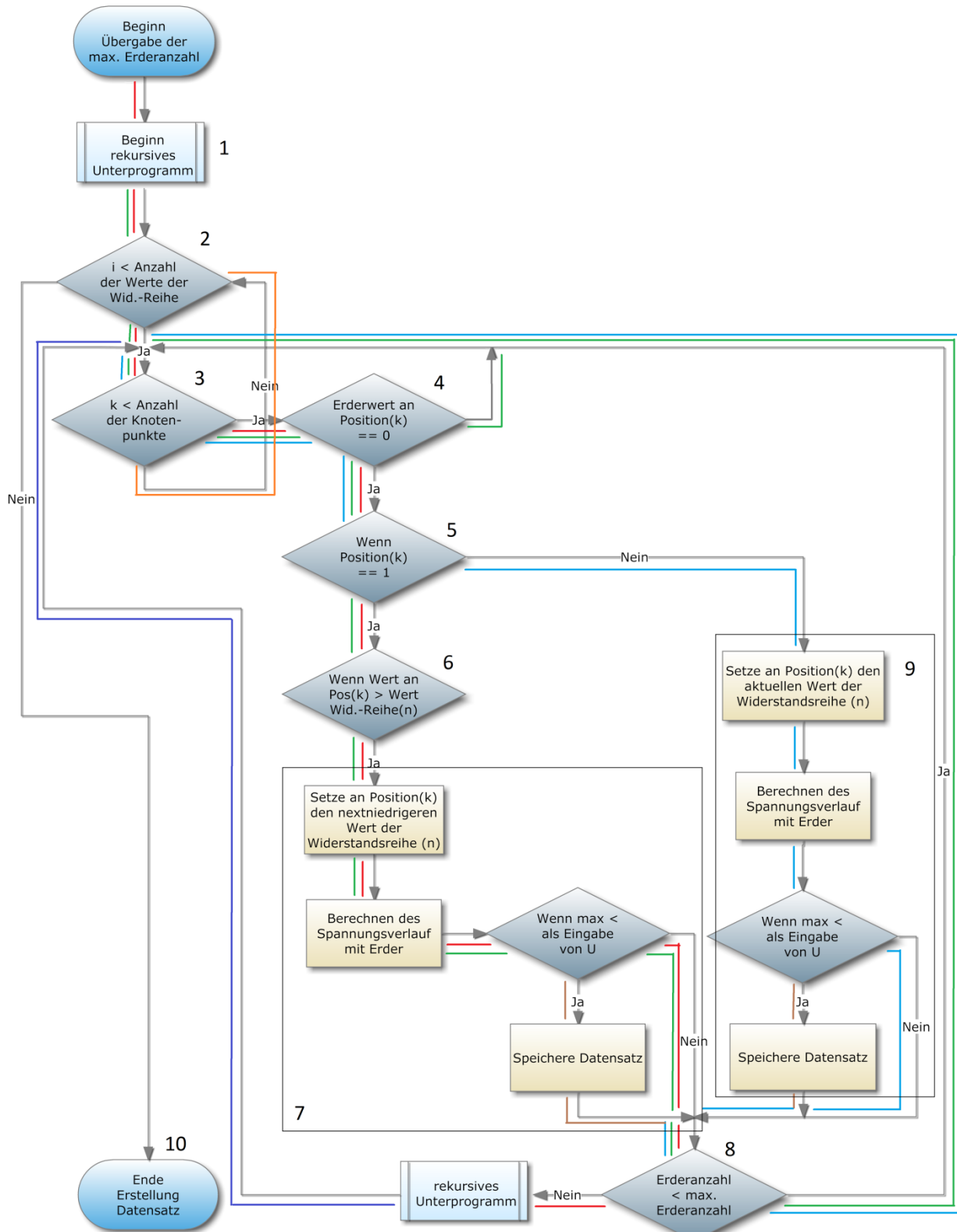


Abbildung 6-1: Flussdiagramm für die Variation von Position und Widerstandswert von Erdungsanlagen inklusive eingezeichneten Verlaufspfaden

Abbildung 6-1 zeigt das Flussdiagramm für die komplizierte Berechnung von Variationen für die unterschiedlichen Positionen und Widerstandswerte der Erdungsanlagen. Die Beschreibung dieses Algorithmus bezieht sich auf die Tabelle 6-2, d.h. es werden zwei Erdungsanlagen verwendet, die Funktionsweise ist aber für beliebig viele Erdungsanlagen allgemeingültig.

Dieser Algorithmus wird von einem höheren Algorithmus aufgerufen und es werden verschiedene Parameter übergeben. Diese sind u.a. die maximale Anzahl an Erdungsanlagen die verwendet werden dürfen, die Widerstandsreihe und die Anzahl der Positionen (Knotenpunkte), an denen die induzierten Spannungen berechnet werden und an denen Erdungsanlagen eingebaut werden können.

Nun wird das Unterprogramm erstmalig gestartet (1) und die erste Erdungsanlage wird erstellt, was als **roter Verlaufspfad** eingezeichnet ist. Die erste (2) und die zweite Verzweigung (3) sind for-Schleifen, welche den aktuellen Wert der Widerstandsreihe (Zähler i) und die aktuelle Position (Zähler k) repräsentieren.

Position (k)	1	2	3	4	5	6	7
Möglichkeit 1	0	0	0	0	0	0	0

Die nächste Verzweigung (4) überprüft, ob an dieser Position ($k = 1$) eine Erdungsanlage überhaupt gesetzt werden kann, denn bestehende Anlagen dürfen nicht überschrieben werden. Im **roten Zweig** wird der Wert 0 zurückgeliefert, also besteht keine Anlage an dieser Position.

Im nächsten Schritt (5) wird überprüft, ob die aktuell verwendete Erdungsanlage mit dem als nächstes zu verwendeten Widerstandswert zum ersten Mal aufgerufen wird. Im roten Pfad trifft diese Situation zu, da die erste Erdungsanlage das erste Mal den Widerstandswert 4 verwenden möchte. Dann wird der derzeit verwendete Widerstandswert mit dem als nächstes in der Widerstandsreihe kommenden Widerstandswert ersetzt, im **roten Verlaufspfad** wird ein sehr hoher Dummy-Wert (10000) durch den Wert 4, welcher der erste und größte der Widerstandsreihe ist, ersetzt (6).

Position (k)	1	2	3	4	5	6	7
Möglichkeit 1	10000 auf 4	0	0	0	0	0	0

Anschließend muss nur mehr dem **roten Verlaufspfad** gefolgt werden. Es wird nun die Möglichkeit 1 generiert und der Spannungsverlauf an der Rohrleitung berechnet. Wenn der maximale Wert dieser Berechnung über der eingegebenen Grenzspannung liegt, wird dieser Datensatz verworfen (7). Da nun erst eine Erdungsanlage verwendet wurde, aber zwei Erdungsanlagen möglich sind, wird in der nächsten Verzweigung (8) die zweite Erdungsanlage in Verwendung gebracht und das komplette Unterprogramm von (1) gestartet. Damit wird der **grüne Verlaufspfad**, und damit Möglichkeit 2 generiert. Die erste Erdungsanlage wird dabei in diesen rekursiven Programmaufruf mitgespeichert.

Position (k)	1	2	3	4	5	6	7
Möglichkeit 1	4	0	0	0	0	0	0
Möglichkeit 2	4	0	0	0	0	0	0

Der **grüne Verlaufspfad** ist bis zur Verzweigung (8) praktisch identisch mit dem des **roten Verlaufspfad**. Einziger Unterschied ist bei Verzweigung (4), diese wird verneint, da die erste Position von der ersten Erdungsanlage bereits besetzt ist. Damit wird die Position (k) in Verzweigung (3) um eins erhöht und Verzweigung (4) wird nicht mehr verneint, da sich dort noch keine Erdungsanlage befindet.

Position (k)	1	2	3	4	5	6	7
Möglichkeit 1	4	0	0	0	0	0	0
Möglichkeit 2	4	4	0	0	0	0	0

Da auch hier die maximale berechnete Spannung höher liegt als die maximal vorgegebene Grenzspannung, wird auch die Möglichkeit 2 verworfen und der Datensatz gelöscht. Da die maximale Erdungsanlagenanzahl nun gleich der verwendeten Anzahl entspricht, wird die Verzweigung (8) verneint und der Algorithmus springt auf die Verzweigung (3) zurück. Dabei wird die Erdungsanlage in Position 2 auf 0 rückgesetzt, die Position (k) auf den Wert 3 erhöht.

Ab hier beginnt der **hellblaue Verlaufspfad** und damit auch die Möglichkeit 3. Bei Verzweigung (5) wird festgestellt, dass bei dieser Erdungsanlage der Widerstandswert bereits verwendet wurde. Also wird dieser auf diesem Wert belassen, da zuerst alle Positionen durchgetestet werden müssen. Damit wird auf Position (k = 3) ebenfalls der Widerstandswert 4 verwendet, und die Berechnung durchgeführt (9).

Position (k)	1	2	3	4	5	6	7
Möglichkeit 1	4	0	0	0	0	0	0
Möglichkeit 2	4	4	0	0	0	0	0
Möglichkeit 3	4	0	4	0	0	0	0

Da auch bei dieser Erdungsanlagenkombination festgestellt wird, dass der maximal berechnete Wert höher als die maximal vorgegebene Grenzspannung ist, wird dieser Datensatz ebenfalls verworfen. Wenn es nun keinen Datensatz gibt, welcher das Primärziel erfüllt, wird immer der **hellblaue Verlaufspfad** ausgeführt, während alle Positionen mit dem gleichen Widerstandswert durchgetestet werden. Da nun Verzweigung (3) den Zähler k bei Position 7 nicht mehr erhöhen kann, wird der **orange Verlaufspfad** ausgeführt und damit die Möglichkeit eröffnet, dass sich der Zähler k zurücksetzt und der nächstniedrigere Wert der Widerstandsreihe für die zweite Erdungsanlage verwendet werden kann. Dadurch entsteht die Möglichkeit 8.

Position (k)	1	2	3	4	5	6	7
Möglichkeit 6	4	0	0	0	0	4	0
Möglichkeit 7	4	0	0	0	0	0	4
Möglichkeit 8	4	3,4	0	0	0	0	0

Nun wiederholt sich sowohl der **grüne** als auch der **hellblaue Verlaufspfad**, bis alle Möglichkeiten für die zweite Erdungsanlage erschöpft sind, während die erste Erdungsanlage weiterhin auf den Widerstandswert 4 (höchster Wert in der Widerstandsreihe) fixiert ist.

Position (k)	1	2	3	4	5	6	7
Möglichkeit 1	4	0	0	0	0	0	0
Möglichkeit 60	4	0	0	0	0	0,5	0
Möglichkeit 61	4	0	0	0	0	0	0,5

Da nun der Zähler i den maximalen Wert erreicht hat, wird der Algorithmus für die zweite Erdungsanlage gestoppt (10). Der komplette Algorithmus wird aber noch nicht beendet, da er sich selbst aufgerufen hat, und folgt dem **dunkelblauen Verlaufspfad** zurück zur Verzweigung (3).

Für die erste Anlage liegt die Position(k) noch immer auf der ersten Stelle. Da zuerst alle möglichen Positionen beim gleichen Widerstandswert durchgetestet werden, wird dieser auf dem aktuellen Wert belassen, und die Position(k) verändert sich um eine Stelle auf Position 2.

Position (k)	1	2	3	4	5	6	7
Möglichkeit 62	0	4	0	0	0	0	0
Möglichkeit 63	4	4	0	0	0	0	0
Möglichkeit 64	0	4	4	0	0	0	0

Die oberen drei Möglichkeiten (62, 63, 64) zeigen, wie sich der Algorithmus weiterentwickelt, im Prinzip verfolgt man die oben beschriebene Vorgehensweise.

Erst wenn alle Positionen der ersten Erdungsanlage durchgetestet sind, wird der nächstniedrigere Wert in der Widerstandsreihe genommen und die Positionen erneut variiert. Durch diese Vorgehensweise entstehen sehr viele mögliche Kombinationen, die berechnet werden müssen. Falls nun bei einem Datensatz die maximal berechnete Spannung niedriger als die maximal eingegebene Grenzspannung ist, wird anstatt des **grünen** oder **hellblauen** Pfades der **braune Verlaufspfad** verwendet (in (7) oder (8), bei Verzweigung „Wenn $\max < \text{als Eingabe von } U$ “). Dadurch wird ein Datensatz mit der maximal berechneten Spannung und der dazugehörigen Erdungsanlagenkonfiguration gespeichert. Wenn es mehrere Datensätze gibt, bei der die maximale Grenzspannung nicht überschritten wird, werden diese ebenfalls gespeichert und als Datenpaket an das aufrufende Programm übergeben. Der Algorithmus wird dann beendet, wenn alle selbstaufrufenden Instanzen beendet sind und die Hauptinstanz (erste Erdungsanlage) ebenfalls alle möglichen Positionen und Widerstandswerte durchgetestet hat (Zähler i und k größer als Vergleichswert).

6.1.3. Beschreibung und Flussdiagramm des VSOAs

Wie bereits in der Einführung erwähnt wird, ist das Ziel dieses Algorithmus von allen möglichen Kombinationen von Erdungsanlagen diejenige herauszufinden, welche sowohl das Primärziel als auch das Sekundärziel bestmöglichst erfüllt. Anhand von Abbildung 6-2 soll gezeigt werden, wo sich die Schwierigkeiten dieser Aufgabe befinden. Dieses einfache Beispiel hat sieben Knotenpunkte, an denen die Spannungen an der Rohrleitung berechnet werden. An diesen sieben Orten können nun Erdungsanlagen eingebaut werden, um den Spannungsverlauf zu optimieren.

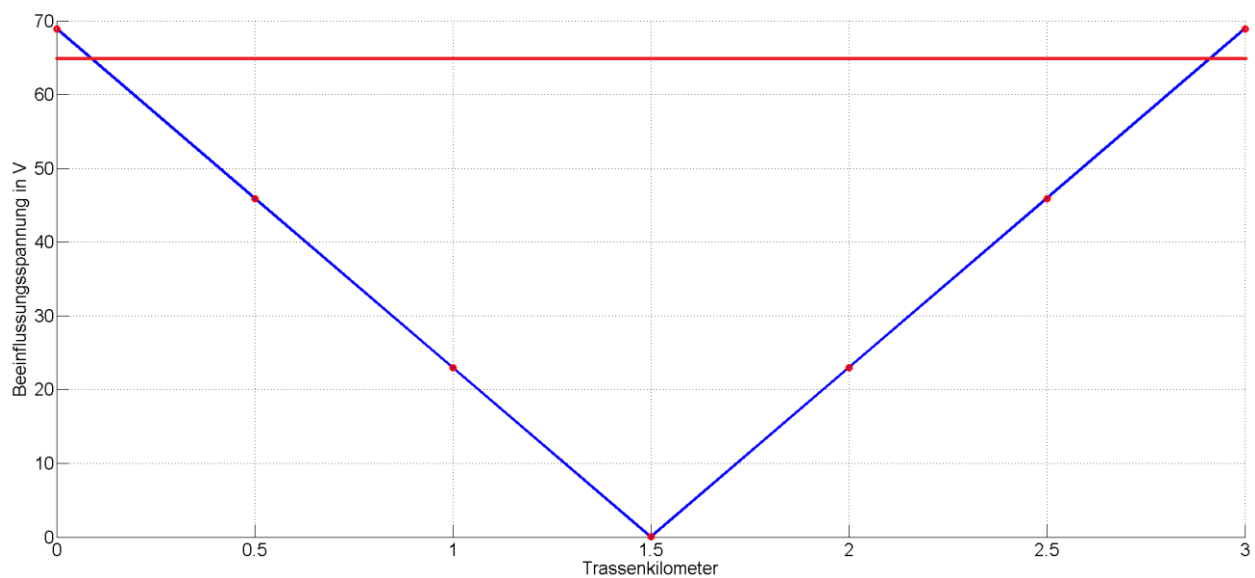


Abbildung 6-2: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten ohne Erdungsanlagen

Anhand dieser Kurve ist zu sehen, dass die maximale Rohrleitungsspannung sowohl am Anfang als auch am Ende ca. 69 Volt beträgt. Wenn man nun eine Optimierung gemäß TE30 durchführen möchte (65 Volt, rote Linie), müssen Erdungsanlagen verbaut werden. Aufgrund von Symmetriebedingungen müssen zwei Erdungsanlagen verbaut werden, der Grund dafür findet sich in Kapitel 6.3.2.

Wenn nun der Algorithmus ausgeführt wird, werden diese zwei Erdungsanlagen sowohl von Wert als auch von der Position variiert, wie es in 6.1.2 beschrieben ist. Dabei entstehen über 4000 Varianten, welche berechnet und gefiltert werden müssen.

Abbildung 6-3 zeigt alle möglichen Berechnungen, bevor die Datensätze durch den Algorithmus von 6.1.2 nach der maximal eingegebenen Grenzspannung gefiltert werden.

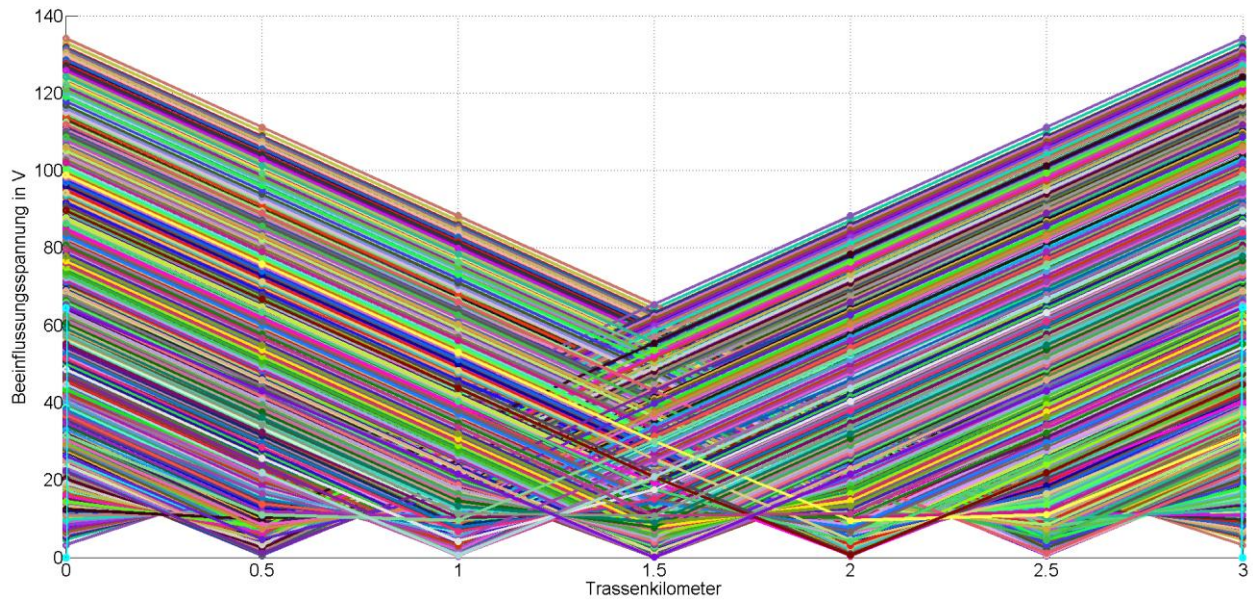


Abbildung 6-3: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten mit zwei Erdungsanlagen ohne Filterung der maximalen Spannung

Abbildung 6-4 zeigt die Spannungsverläufe, welche sich unter der eingegebenen Grenzspannung von 65 Volt befinden. Insgesamt gibt es 28 verschiedene Möglichkeiten, wie das Primärziel erreicht werden kann, aber nur eine Möglichkeit erzielt auch das Sekundärziel, eine technisch-wirtschaftlich, optimale Lösung.

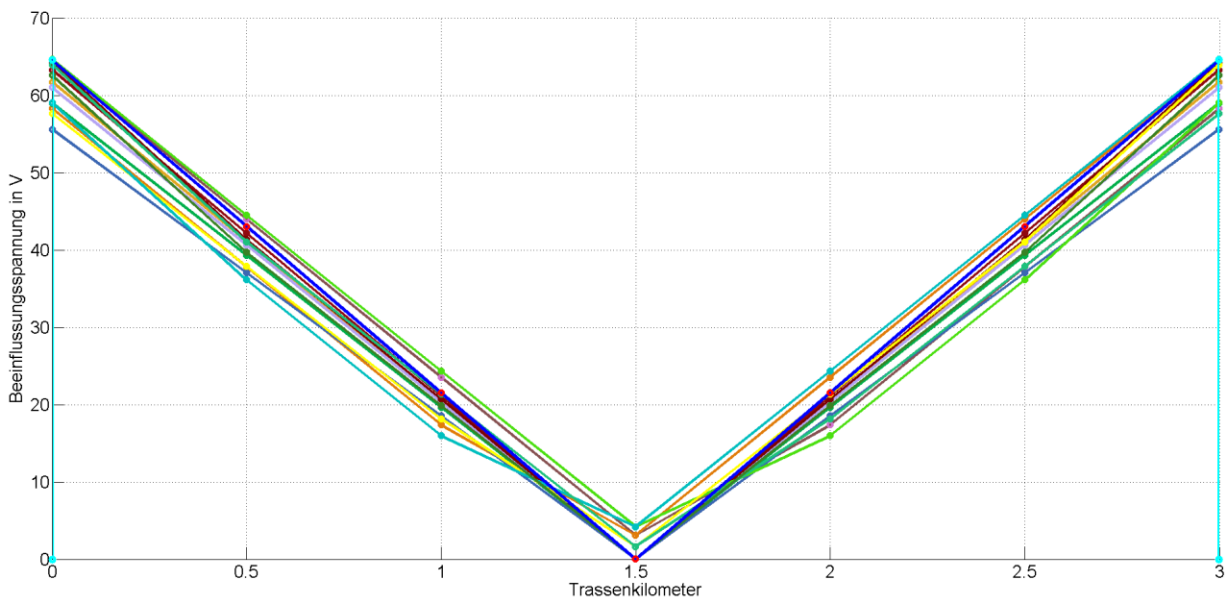


Abbildung 6-4: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten mit zwei Erdungsanlagen mit Filterung der maximalen Spannung

Bedingt durch den Algorithmus, welcher die Erdungsanlagen variiert, sowie des verwendeten symmetrischen Beispiels, können die Ergebnisse mehrmalig vorkommen, da sie gespiegelt sind. Dies fällt besonders dann auf, wenn eine Erdungsanlage an Position 1 oder 7 und die zweite an Position 2 oder 6 ist. Auf die technisch-wirtschaftliche Optimallösung hat dies keinen Einfluss, Tabelle 6-3 zeigt alle Lösungen, nachdem die mehrfachen Lösungen herausgefiltert worden sind.

Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6	Position 7	Kosten
1,7Ω	0	0	0	0	0	1,7Ω	23529 GE
1,3Ω	0	0	0	0	0	1,3Ω	30769 GE
1,0Ω	0	0	0	0	0	1,0Ω	40000 GE
1,0Ω	0	0	0	0	0	0,9Ω	42222 GE
0,9Ω	0	0	0	0	0	0,9Ω	44444 GE
0,7Ω	0	0	0	0	0	0,7Ω	57143 GE
0	0,7Ω	0	0	0	0,7Ω	0	57143 GE
0,9Ω	0	0	0	0	0,5Ω	0	62222 GE
0,7Ω	0	0	0	0	0,5Ω	0	68571 GE
0,5Ω	0	0	0	0	0	0,5Ω	80000 GE
0	0,5Ω	0	0	0	0,5Ω	0	80000 GE

Tabelle 6-3: Übersicht über alle Lösungen, die unter der maximal vorgegebenen Grenzspannung sind

Wie anhand der Kosten eindeutig zu sehen ist, ist die erste Lösung die kostengünstigste, daher wird diese Lösung für das Problem verwendet und in Abbildung 6-5 gesondert dargestellt. Sie erfüllt damit sowohl das Primärziel als auch das Sekundärziel optimal.

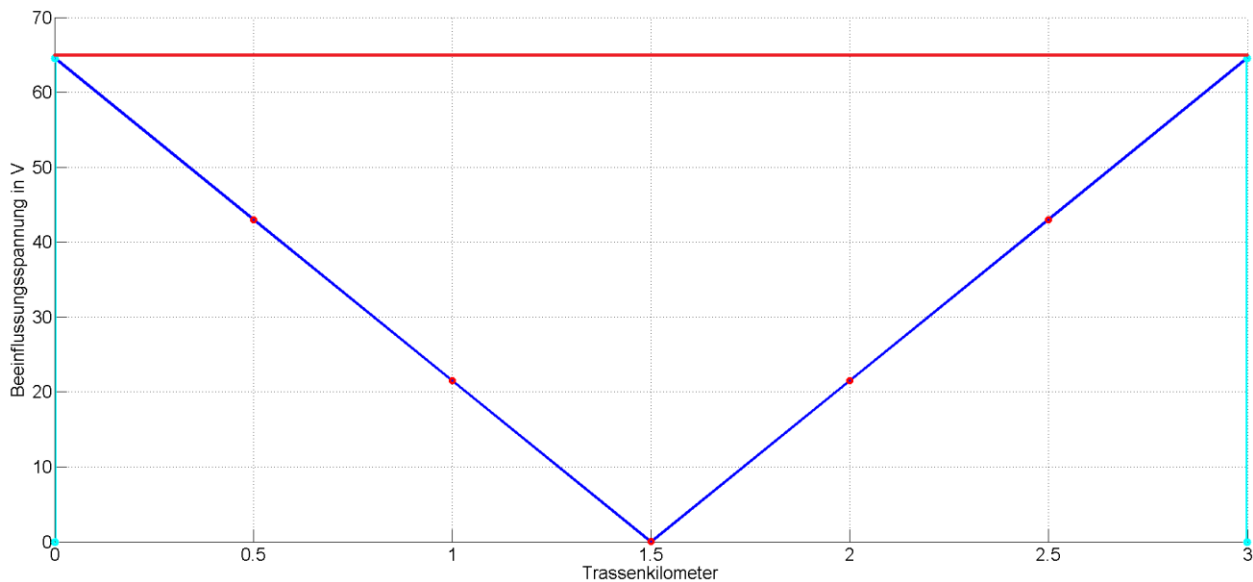


Abbildung 6-5: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkte mit zwei Erdungsanlagen, technisch-wirtschaftliche optimale Lösung

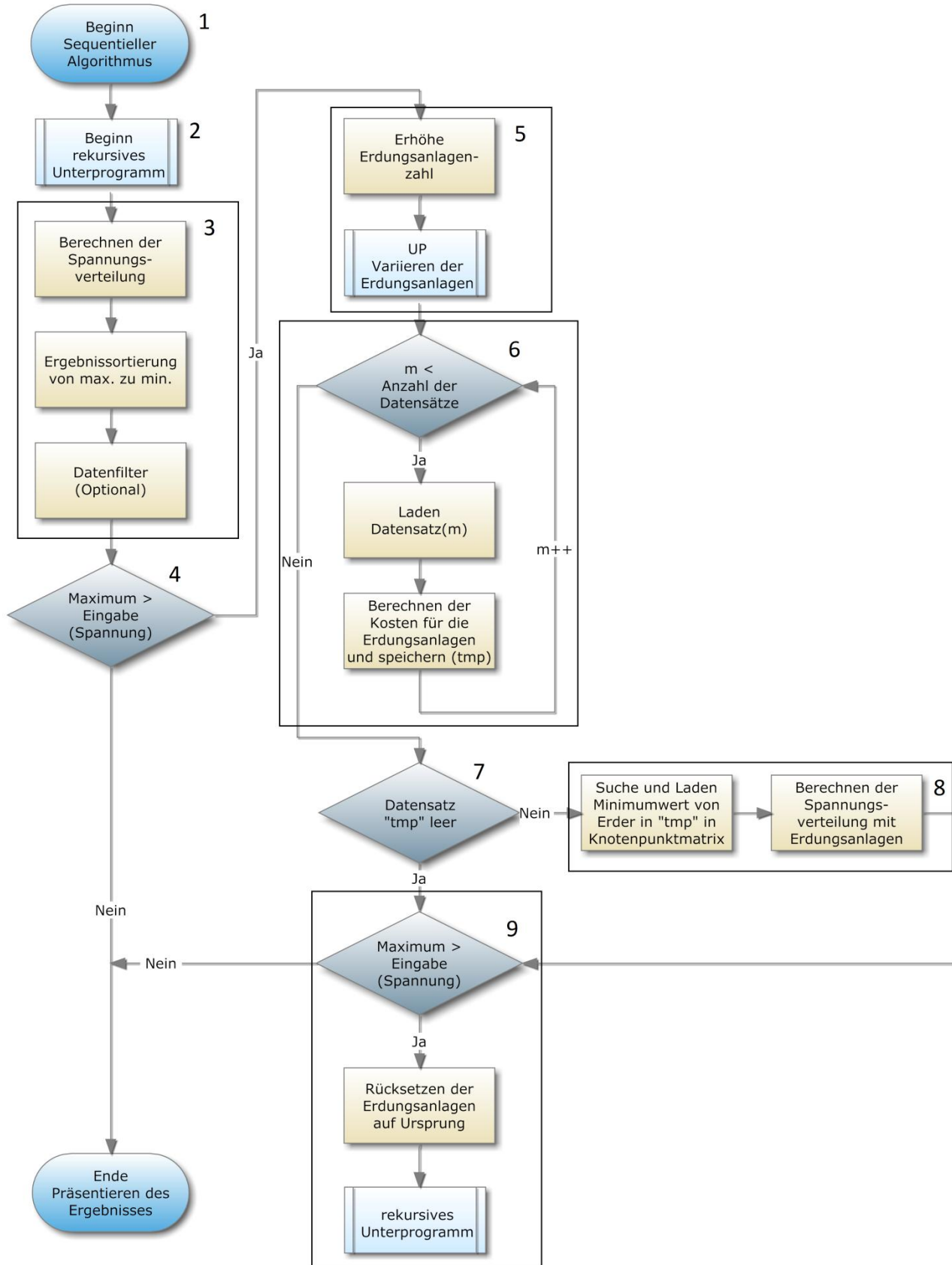


Abbildung 6-6: Flussdiagramm für den vollständigen Such- und Optimieralgorithmus

Abbildung 6-6 zeigt das Flussdiagramm des vollständigen Such- und Optimieralgorithmus. Nachdem der Algorithmus über (1) oder rekursiv über (2) gestartet wird, wird im ersten Teil (3) die Spannungsverteilung an der Rohrleitung berechnet. Anschließend werden die berechneten Spannungen an den Knotenpunkten vom Maximal- zum Minimalwert sortiert. Durch einen optionalen Datenfilter können die Daten nun gefiltert werden, dadurch können Bereiche automatisch ausgeschlossen werden, an denen Erdungsanlagen vermutlich keinen Sinn machen. Damit wird die Menge an zu berechnenden Knotenpunkten und somit die Datenmenge reduziert.

Wenn nun die maximale Spannung im Spannungsverlauf an der Rohrleitung höher ist als die eingegebene Grenzspannung (4), müssen zusätzliche Erdungsanlagen eingebaut werden. Wenn keine Erdungsanlagen benötigt werden, wird der Algorithmus beendet (wichtig für den ersten Durchlauf). Werden zusätzliche Erdungsanlagen benötigt, wird deren Anzahl erhöht (im ersten Durchlauf von null auf eins, im zweiten Durchlauf von eins auf zwei etc.). Die Variation der Erdungsanlagen erfolgt im Unterprogramm „Variieren der Erdungsanlage“, welches im Kapitel 6.1.2 beschrieben ist, gleichzeitig wird ein Datenpaket zurückgeliefert, welches entweder keine oder gültige Datensätze enthält (5).

Die Berechnung der Kosten (6) wird übersprungen, wenn es keine gültigen Datensätze gibt. Ansonsten werden die einzelnen Datensätze im Datenpaket durchberechnet und die Kosten der Erdungsanlagen für jeden Datensatz berechnet und im Datensatz „tmp“ gespeichert. Tabelle 6-3 zeigt ein Beispiel, wie dieser Datensatz aussehen kann.

Mit Verzweigung (7) wird überprüft, ob Daten im Datensatz „tmp“ existieren. Wenn die berechneten Kosten der Erdungsanlagen jedes Datensatzes in „tmp“ vorhanden sind, werden diese in (8) nach den minimalen Kosten sortiert. Der Datensatz mit den geringsten Kosten wird als die optimale Lösung erkannt und die im Datensatz befindlichen Erdungsanlagen werden zu den Knotenpunkten hinzugefügt. Anschließend wird die Spannungsverteilung neu berechnet und in der grafischen Oberfläche mit den Erdungsanlagen präsentiert. Damit ist die Bedingung für die Verneinung der Verzweigung (9) erfüllt und der Algorithmus wird mit der optimalen Lösung beendet.

Wenn es aber keine Ergebnisse gibt, die das Primärziel erfüllen, dann bleibt der Datensatz „tmp“ leer und Verzweigung (7) verweist direkt auf die Verzweigung im Block (9). Dadurch werden alle Daten rückgesetzt (inklusive der zusätzlich hinzugefügten Erdungsanlagen) und im nächsten Schritt wird der Algorithmus bei (2) rekursiv gestartet. Der Unterschied beim rekursiven Aufruf gegenüber einem Neustart des Algorithmus ist, dass die Anzahl der vorher verwendeten Erdungsanlagen gespeichert ist, und z.B. nun zwei Erdungsanlagen beim zweiten Durchlauf des Algorithmus (inklusive des „Variieren der Erdungsanlagen“-Unterprogramms) verwendet werden (5).

Wenn alle rekursiven Aufrufe inklusive der Hauptinstanz beendet sind, wird das Ergebnis in der grafischen Oberfläche präsentiert. Es können mehrere Erdungsanlagen verwendet werden, welche sich in Position und eventuell in Wert unterscheiden.

6.2. Randomisierter Algorithmus

6.2.1. Einführung in randomisierte Algorithmen

6.2.1.1. Ein demonstrierendes Beispiel

Wie bereits in Tabelle 6-2 (Kapitel 6.1.2) gezeigt wird, können viele mögliche Kombinationen von Erdungsanlagen gebildet werden, im konkreten Beispiel wird dies mit zwei Anlagen gezeigt. Dabei stellt sich die Frage, wie viele mögliche Kombinationen nun in Frage kommen. Dazu kann in diesem Beispiel jede Erdungsanlage zehn verschiedene Werte annehmen (= die bereits verwendete Widerstandsreihe [4 ; 3,4 ; 2,8 ; 2,2 ; 1,7 ; 1,3 ; 1 ; 0,9 ; 0,7 ; 0,5] Ω), des Weiteren kann die Position an der Rohrleitung variiert werden.

In Tabelle 6-4 und in Abbildung 6-7 wird gezeigt, wie schnell die möglichen Kombinationen bei ansteigenden Positionsmöglichkeiten entlang des Leiters wachsen, wenn nur **zwei** Anlagen mit zehn Widerstandswertmöglichkeiten verwendet werden. Dazu wird auch die erwartete Laufzeit bei **1 ms Ausführungszeit** je Berechnung gelistet.

Rohrleitungs-knotenpunkte am Leiter	Mögliche Erdungs-elementekombinationen	Erwartete Rechenzeit [s]	Erwartete Rechenzeit [min]
2	400	0,4	0 min 01 sec
7	4900	4,9	0 min 05 sec
25	62500	62,5	1 min 03 sec
50	250000	250	4 min 10 sec
100	1000000	1000	16 min 40 sec
200	4000000	4000	66 min 40sec

Tabelle 6-4: Rechenzeit für die Variation von zwei Erdungsanlagen bei unterschiedlichen Anzahl an Rohrleitungsknotenpunkte

Rohrleitungs-knotenpunkte am Leiter	Mögliche Erdungs-elementekombinationen	Erwartete Rechenzeit [s]	Erwartete Rechenzeit [min]
2	800	8	0 min 08 sec
7	34300	343	5 min 43 sec
25	1562500	15625	260 min 25 sec
50	12500000	125000	2083 min 20 sec
100	100000000	1000000	16666 min 40 sec
200	800000000	8000000	133333 min 20 sec

Tabelle 6-5: Rechenzeit für die Variation von drei Erdungsanlagen bei unterschiedlichen Anzahl an Rohrleitungsknotenpunkte

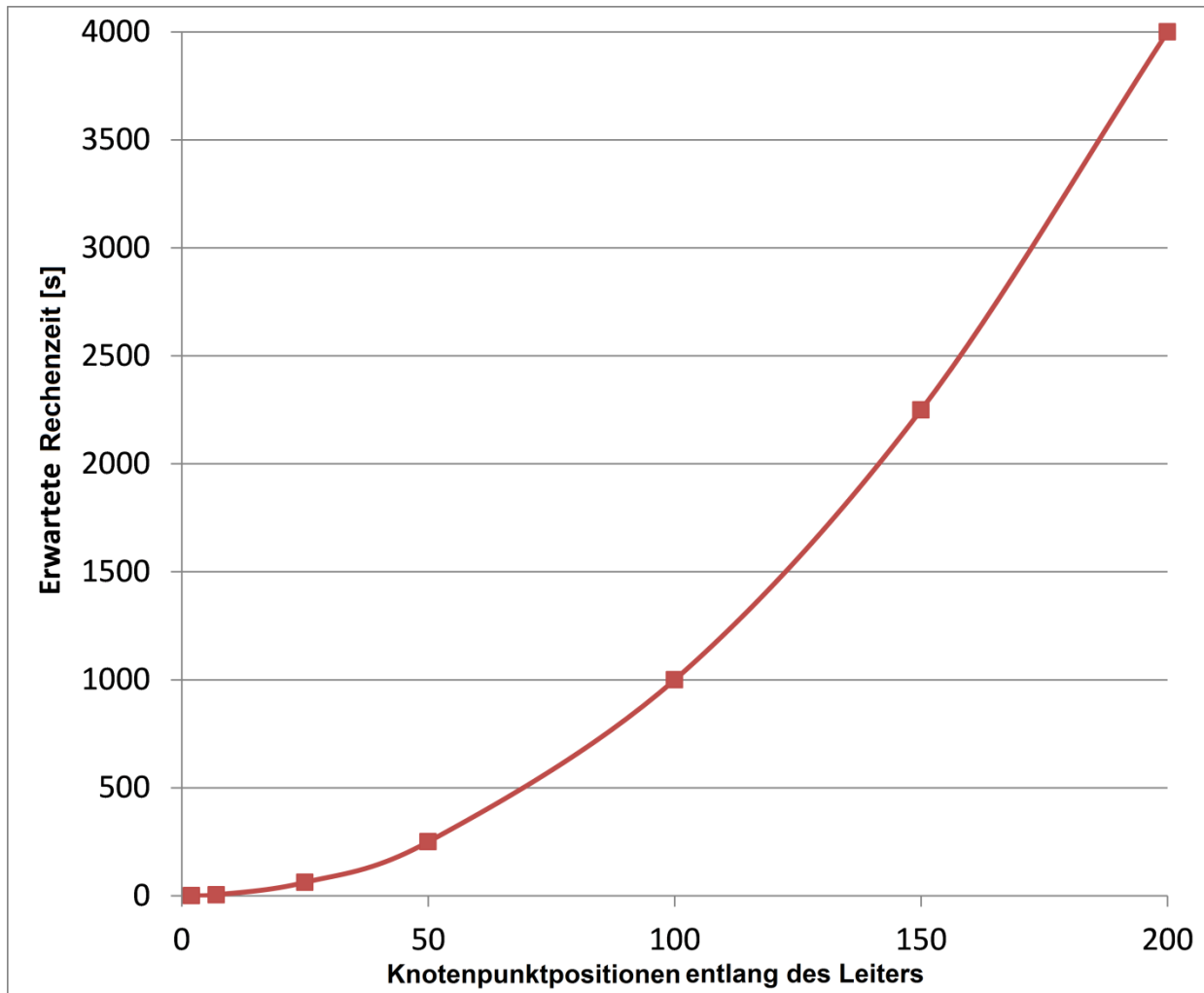


Abbildung 6-7: Rechenzeit für die Variation von zwei Erdungsanlagen bei unterschiedlichen Rohrleitungsknotenpunkte

Wie zu erkennen ist, steigt die Laufzeit bei steigenden Knotenpunktpositionen, an denen Erdungsanlagen eingebaut werden können, exponentiell an. Um das Problem zu verdeutlichen, ist in Tabelle 6-5 das gleiche Beispiel nochmals ausgeführt, aber es werden **drei** Erdungsanlagen verwendet. Wenn man die erwartete Laufzeit betrachtet, steigt die Ausführungszeit sehr schnell in einen Bereich, wo eine Berechnung unpraktisch wird, selbst wenn die Ausführungszeit nur 1/10 des oberen Beispiels beträgt.

Was wäre, wenn man einen Algorithmus verwendet, welcher per Zufall (Random) eine Erdungselementkombination verwendet, die das geforderte Primärziel möglicherweise in einem Bruchteil der Zeit löst? Dieser hätte vielleicht nicht das optimale Ergebnis, aber dafür den gewaltigen Vorteil, dass die berechnende Ressource relativ schnell für andere Aufgaben zur Verfügung stehen würde. Somit ist ersichtlich, wo der Einsatzzweck von randomisierte Algorithmen liegt.

6.2.1.2. Grundlagen

Wie aus dem vorangegangenen Beispiel deutlich wird, werden randomisierte Algorithmen dort verwendet, wo die Laufzeit unakzeptabel hoch ist. Sie lösen schwierige Probleme in relativ kurzer, akzeptabler Laufzeit, haben jedoch den Nachteil, dass sie meistens nicht die optimale Lösung finden. Daher muss bei der Problemlösung ein gewisses Maß an Fehlern akzeptiert werden. Richtige randomisierende Algorithmen sind nicht-deterministisch, d.h. es ergeben sich für die gleiche Eingabe fast immer unterschiedliche Lösungen. Es kann auch sein, dass der Algorithmus nicht terminiert, also keine Lösung findet. Bei gewissen Algorithmen muss man sogar davon ausgehen, dass der Lösungsvorschlag nicht korrekt ist. Jedoch überwiegt der Vorteil der kürzeren Laufzeit und einige der oben genannten Nachteile können durch geeignete Lösungen abgefangen werden. Oder manchmal gibt es schlicht und einfach keinen besseren Algorithmus, weil einfach das Finden des besten Algorithmus für die Aufgabe zu viel Zeit in Anspruch nimmt [29] [30].

Randomisierte Algorithmen werden auch probabilistische Algorithmen genannt, unterscheiden sich aber bei genauerer Betrachtung von diesen. Randomisierte Algorithmen verwenden im Gegensatz zu einem deterministischen Algorithmus zufällige Bits, um ihren Ablauf zu steuern und damit zu einem Ergebnis zu kommen. Damit gilt, dass jeder Neustart des Algorithmus unterschiedliche Zwischenergebnisse (nicht-Determinismus) und unterschiedliche Determiniertheit hat [30] [31].

6.2.1.3. Typen von Random-Algorithmen

Praktisch betrachtet wird beim **probabilistischen Algorithmus** die Eingabe zufällig gewählt, d.h. aber auch, dass selbst bei zufälliger Eingabe der Ablauf im Algorithmus immer der Gleiche sein wird. Er ist deterministisch. Dabei ist auch zu beachten, dass es dadurch recht einfach ist, über die Eingabe den schlechtesten Fall auszulösen. Ein **randomisierter Algorithmus** erzeugt die zufälligen Werte intern, ist also von der Eingabe unabhängig. Dadurch ist es unmöglich vorherzusagen, wie der Ablauf innerhalb des Algorithmus sein wird und auch eine exakte Wiederholung des vorhergehenden Ablaufes ist eher unwahrscheinlich. Dadurch gilt, dass es keine spezielle mutwilligen Eingaben geben kann, die den schlechtesten Fall auslösen, sondern dieser nur dann ausgelöst wird, wenn der Zufallszahlengenerator einen ungeeigneten zufälligen Wert liefert [15].

6.2.1.4. Mittlere versus erwartete Laufzeit

Die probabilistische Analyse wird vorwiegend dazu verwendet, um Laufzeiten von Algorithmen abzuschätzen. Dazu wird Wissen über die Verteilung der Eingaben benötigt oder es müssen sorgfältige Annahmen getroffen werden. Bei einigen Problemen ist dies in sinnvoller Weise möglich, bei anderen kann diese Verteilung nicht sinnvoll beschreiben werden. Daher ist nur im ersten Fall ist eine

probabilistische Analyse sinnvoll (mehr dazu siehe [15], Seite 119ff). Daraus kann die „mittlere“ Eingabe ermittelt werden, damit ist der Durchschnitt aller möglichen Eingaben gemeint. In der Tat wird die Laufzeit für alle möglichen Eingaben gemittelt, man spricht von der mittleren Laufzeit [15].

Ein Algorithmus heißt dann randomisiert, wenn Werte verwendet werden, welche durch einen (Pseudo)Zufallszahlengenerator erzeugt werden. Hier wird bei der Laufzeitanalyse der Erwartungswert über die Verteilung der Werte, welche vom Generator erzeugt werden, verwendet. Durch diesen Erwartungswert spricht man von einer erwarteten Laufzeit [15].

Mittlere Laufzeit wenn die Wahrscheinlichkeitsverteilung über die Eingabe definiert wird.

Erwartete Laufzeit wenn der Algorithmus selbst zufällige Entscheidungen trifft (Zufallszahlengenerator)

6.2.1.5. Fehlerwahrscheinlichkeit

Die Fehler- bzw. Versagenswahrscheinlichkeit ist bei randomisierenden Algorithmen ein entscheidendes Kriterium bzw. Problem. Da diese Algorithmen durch die Verwendung von Zufallsbits zwar meistens sehr schnell zu einem Ergebnis kommen, das Ergebnis aber nicht immer optimal ist, existiert eine gewisse Fehlerwahrscheinlichkeit.

Dieser Fehler kann bei einem fehlerfreien Algorithmus reduziert werden, indem der Algorithmus mehrmals ausgeführt wird. Ist der Fehler z.B. $\frac{1}{2}$ (nur jedes zweite Mal kann ein gewünschtes Ergebnis erreicht werden), kann dieser durch k-maliges Ausführen auf $\frac{1}{2}^k$ reduziert werden. Wenn ein Algorithmus 100-mal ausgeführt wird, nimmt die Fehlerwahrscheinlichkeit einen Wert von $\frac{1}{2}^{100}$ an und wird verschwindend klein. Dadurch wird ein Ergebnis erreicht, welches relativ nahe am Optimum ist. Ziel ist es aber, die Anzahl der Durchläufe des Algorithmus so zu wählen, dass der Fehler unter einem gewissen Wert bleibt, und trotzdem die Laufzeit nicht allzu hoch ausfällt [30] [31].

Es gibt 2 Varianten von erlaubten Fehlern [30] [31]:

- **Einseitiger Fehler:** Es darf nur bei einer der möglichen Ausgaben (Ja/Nein) ein Fehler mit einer bestimmten Fehlerwahrscheinlichkeit (< 1) auftreten. Eingaben, bei denen die richtige Antwort Ja lautet, dürfen verworfen werden, richtige Nein-Antworten müssen auf alle Fälle verworfen werden.
- **Zweiseitige Fehler:** Es darf sowohl bei der Ja- als auch Nein-Ausgabe ein Fehler auftreten. Die Wahrscheinlichkeit dafür liegt jeweils bei $\frac{1}{2}$, also kann bei jeder Antwort davon ausgegangen werden, dass sie mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 50% richtig ist. Eingaben, bei denen die richtige Antwort Ja lautet, dürfen verworfen werden, richtige Nein-Antworten dürfen aber verwendet werden.

6.2.2. Monte-Carlo- versus Las-Vegas-Algorithmus

Die Verwendung von Zufallszahlen kann zwei mögliche Auswirkungen haben:

- die Laufzeit ist zufällig
- das Ergebnis ist zufällig

Daher unterteilt man grob in zwei Klassen: Monte-Carlo und Las-Vegas Algorithmus.

6.2.2.1. Monte-Carlo-Algorithmus (MCA)

Der MCA wird verwendet, wenn es keinen effizienten Algorithmus für ein Problem gibt oder keine vernünftige Annäherungslösung dafür gefunden wird. Die Komplexität des MCA ist recht gering, er ist sehr effizient und lässt sich relativ leicht in bereits bestehende Algorithmen implementieren und kann sowohl für Entscheidungs- als auch Optimierungslösungen verwendet werden. Als wichtiges Kriterium wird beim MCA seine Laufzeit im schlechtesten Fall herangezogen [29] [30] [31] [32].

Der Algorithmus gibt immer eine Antwort und darf aber mit einer nach oben beschränkten Wahrscheinlichkeit ein falsches Ergebnis liefern, ohne dass der Algorithmus eine Warnung ausgibt. Diese Fehlerwahrscheinlichkeit kann weiter verbessert werden, indem der Algorithmus öfters ausgeführt wird (siehe 6.2.1.5).

Wenn der MCA als Entscheidungsalgorithmus (Probleme mit einer Ja/Nein-Antwort) verwendet wird, wird zwischen ein- und zweiseitigen Fehlern unterschieden. Bei zweiseitigen Fehlern darf der MCA sowohl *False Positives* als auch *False Negatives* liefern. *False Positives* liefern bei der Antwort ein Ja, obwohl ein Nein richtig wäre, *False Negatives* liefern bei der Antwort ein Nein, obwohl ein Ja richtig wäre. Wenn der einseitige Fehler verwendet wird, darf nur einer dieser zwei Fälle auftreten. Meistens wird der MC-Algorithmus mit einem einseitigen Fehler verwendet, dann spricht man von *False Negatives* [33].

Beim Monte-Carlo-Algorithmus ist die Laufzeit konstant, aber das Ergebnis zufällig.

6.2.2.2. Las-Vegas-Algorithmus (LVA)

Der LVA hat in etwa das gleiche Einsatzgebiet wie der MCA. Die Besonderheit an diesem Algorithmus liegt darin, dass er niemals falsche Ergebnisse liefern darf. Dadurch ist die Komplexität zufällig, im schlechtesten Fall benötigt der Las-Vegas-Algorithmus lange, bis er zu einem Ergebnis kommt. Beim LVA ist die erwartete Laufzeit interessant, da eine unglückliche Wahl der Zufallszahl selten auftritt. Dadurch ist die erwartete Laufzeit geringer als bei sequentiellen Algorithmen [34].

Für den LVA gibt es zwei unterschiedliche Einsatzbereiche [29] [34] [35]:

Im ersten Fall ist es wichtig, dass der LVA ein richtiges Ergebnis liefert. Die Laufzeit ist egal.

Im zweiten Fall muss der Algorithmus nicht immer eine richtige Lösung liefern, sondern darf über eine beschränkte Fehlerwahrscheinlichkeit keine Lösung finden. In diesem Fall kann der Algorithmus wiederholt werden bis es eine Lösung gibt. Oder seine Laufzeit wird beschränkt, wobei das Risiko besteht, dass es keine Lösung für das gesuchte Problem gibt.

6.2.2.3. Vergleich und Zusammenhang zwischen MCA und LVA

Ein Las-Vegas-Algorithmus kann immer in einen Monte-Carlo-Algorithmus umgewandelt werden. Wenn der LVA keine Lösung findet, kann diese im MCA einfach als falsche Ausgabe interpretiert werden.

Im Gegensatz dazu kann ein Monte-Carlo-Algorithmus nicht so einfach in einen Las-Vegas-Algorithmus umgewandelt werden, weil der MCA seine falschen Lösungen nicht extra kennzeichnet. Um nun doch eine Umwandlung durchzuführen, muss zusätzlich ein Verifizier eingeführt werden, welcher die berechneten Lösungen des MCA auf Korrektheit überprüft.

	Laufzeit	Ergebnis
Monte-Carlo-Algorithmus	konstant	zufällig
Las-Vegas-Algorithmus (Laufzeit egal)	zufällig	sicher richtig
Las-Vegas-Algorithmus (Laufzeit beschränkt)	beschränkt	beschränkt richtig

Tabelle 6-6: Vergleich zwischen MCA und LVA

In der Vergleichstabelle ist zu sehen, dass man sich je nach Anforderung an Laufzeit oder Ergebnis für einen randombasierenden Algorithmus entscheiden muss. Jedoch kann das Ergebnis immer verbessert werden, wenn Algorithmus 1 bzw. 3 öfters ausführt wird. Dadurch nähern sie sich immer mehr in Richtung des Algorithmus 2, also einen Las-Vegas-Algorithmus, dessen Laufzeit egal bei einem sicher richtigem Ergebnis ist.

Da bei der Aufgabenstellung ein Ergebnis gefordert wird, welches sicher richtig ist, wird ein Las-Vegas-Algorithmus verwendet, der höchstwahrscheinlich ein Ergebnis liefert, solange die Laufzeit einen beschränkten hohen Wert nicht überschreitet.

6.2.3. Beschreibung und Flussdiagramm des Las-Vegas-Algorithmus

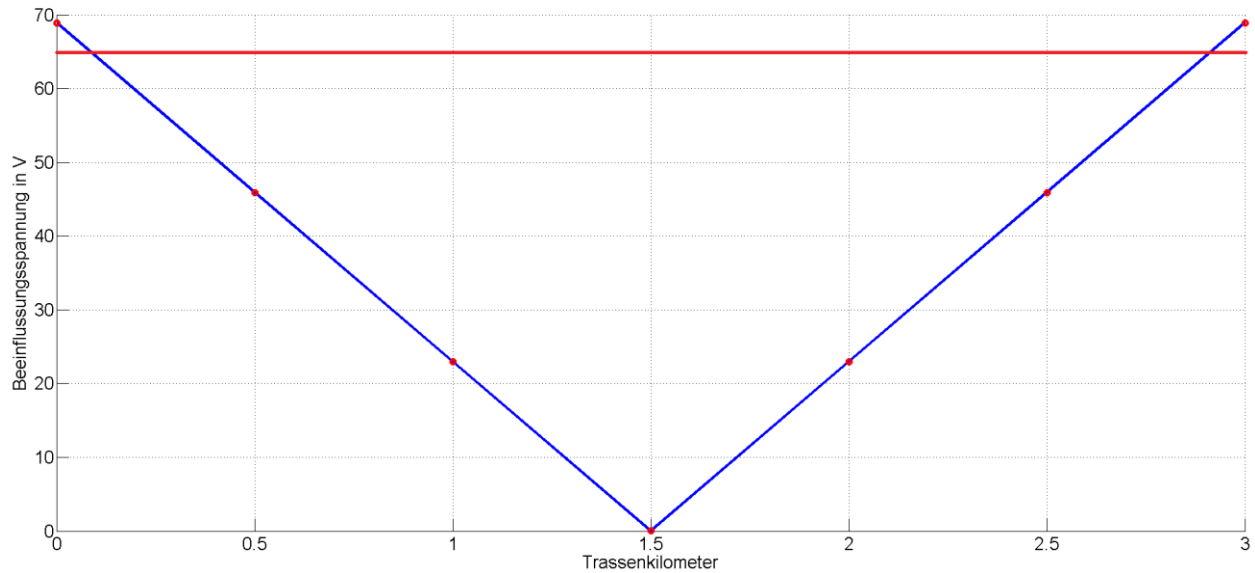


Abbildung 6-8: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten ohne Erdungsanlagen

Die Ausgangslage für den Las-Vegas-Algorithmus ist identisch wie beim vollständigen Such- und Optimieralgorithmus. Der Spannungsverlauf an der Rohrleitung ist nochmals in Abbildung 6-8 zu sehen. Die maximale Spannung liegt bei ca. 69 Volt und der Algorithmus muss die Erdungsanlagen so verwenden, dass er unter 65 Volt (rote Linie) optimiert. Ebenfalls gilt hier, dass aufgrund der Symmetriebedingung insgesamt zwei Erdungsanlagen verbaut werden müssen.

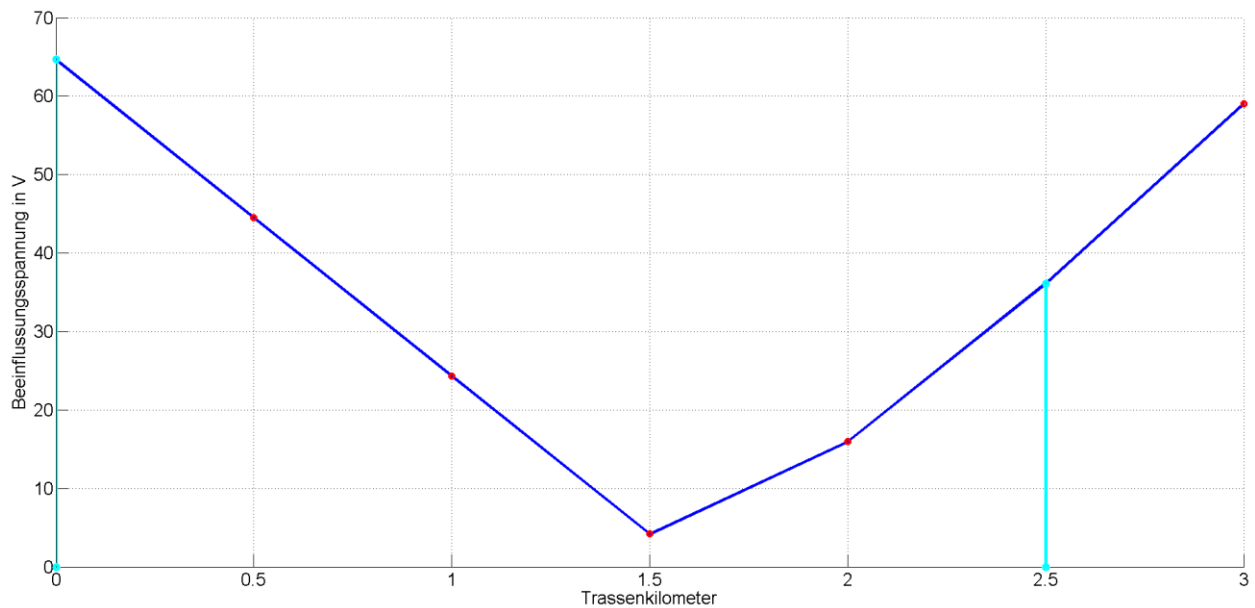


Abbildung 6-9: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und zwei Erdungsanlagen; Las-Vegas-Algorithmus, eine mögliche Lösung

Im Gegensatz dazu ist beim Las-Vegas-Algorithmus keine Vorhersage möglich, welches Ergebnis der Algorithmus zur Erfüllung des Primärziels präsentiert, d.h. auch, dass die Lösung nicht kostenoptimiert ist.

Die einzige Lösung besteht darin, dass der Algorithmus mehrfach ausgeführt wird. Dadurch kann eine Annäherung an die optimale Lösung stattfinden und der Fehler reduziert werden. Abbildung 6-10 zeigt zehn mögliche Lösungen, um den Spannungsverlauf an der Rohrleitung unter die geforderten 65 Volt zu bekommen.

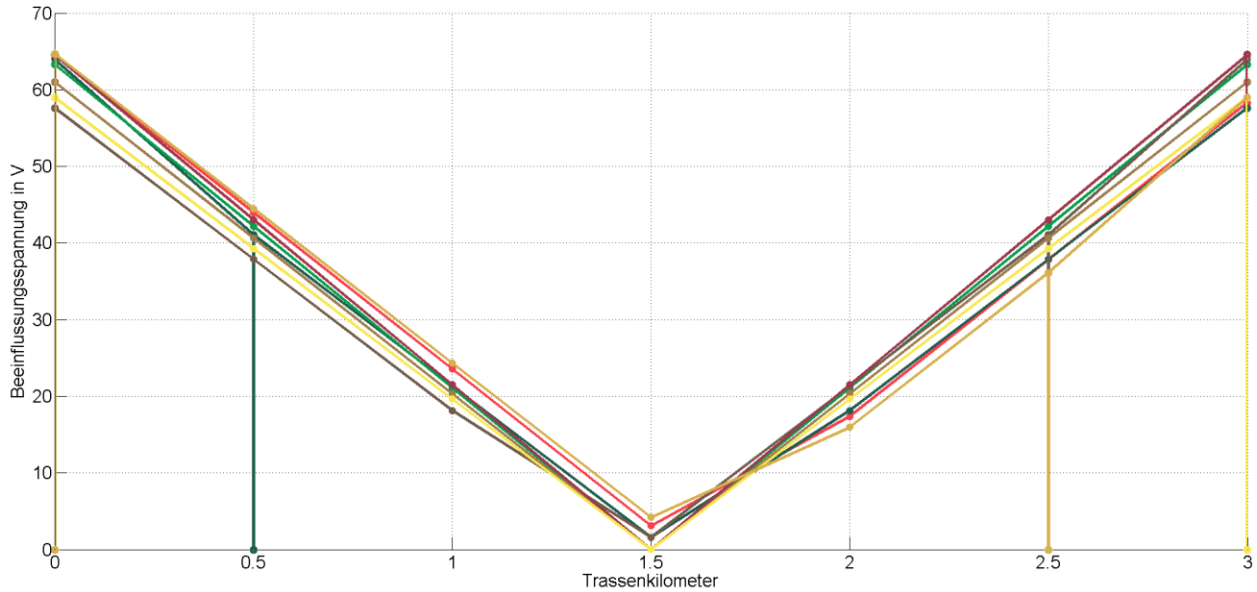


Abbildung 6-10: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und zwei Erdungsanlagen; Las-Vegas-Algorithmus, zehn mögliche Lösungen

Position Nr.	1	2	3	4	5	6	7	Kosten der Anlagen	Laufzeit
Möglichkeit 1	0	0,5 Ω	0	0	0	0	0,9 Ω	62222 GE	0,250 s
Möglichkeit 2	0	0,7 Ω	0	0	0	0,7 Ω	0	57143 GE	0,706 s
Möglichkeit 3	0	0,5 Ω	0	0	0	0	0,9 Ω	62222 GE	0,101 s
Möglichkeit 4	0,9 Ω	0	0	0	0	0	0,9 Ω	44444 GE	0,231 s
Möglichkeit 5	1,0 Ω	0	0	0	0	0	0,9 Ω	42222 GE	0,338 s
Möglichkeit 6	0	0,5 Ω	0	0	0	0	0,7 Ω	68571 GE	0,153 s
Möglichkeit 7	1,0 Ω	0	0	0	0	0	1,0 Ω	40000 GE	0,434 s
Möglichkeit 8	0	0,7 Ω	0	0	0	0,7 Ω	0	57143 GE	1,271 s
Möglichkeit 9	0,5 Ω	0	0	0	0	0	0,5 Ω	80000 GE	0,163 s
Möglichkeit 10	0,9 Ω	0	0	0	0	0	1,0 Ω	42222 GE	0,351 s

Tabelle 6-7: Übersicht über die ersten zehn möglichen Lösungen des LVA

In Tabelle 6-7 sind die zehn möglichen Erdungsanlagen nach Position und Widerstandswert aufgelistet, welche in Abbildung 6-10 als Graphen dargestellt sind. Aus dem Vergleich dieser Tabelle mit Tabelle 6-3 geht hervor, dass der LVA die zwei besten Lösungen dem Benutzer des Programms gar nicht präsentiert. Damit ist sofort klar, wo die Grenzen von randombasierenden Algorithmen liegen. Sie können schnell ein Ergebnis erzeugen, aber meistens ist es nicht die optimale Lösung.

Da hier der Las-Vegas-Algorithmus verwendet wird, ist auch die Laufzeit variabel, da der Algorithmus solange zufällige Erdungsanlagen mit Position und Widerstandswert erzeugen muss, bis er ein richtiges Ergebnis findet. Die Laufzeiten (letzte Spalte) variieren zwischen 0,101 und 1,271 Sekunden, d.h. der schlechteste Wert ist um 1260 % langsamer. Je komplexer das Problem ist, z.B. bei mehreren Erdungsanlagen oder kaum verfügbare Auswahl an Lösungen, desto größer wird die Differenz zwischen der kürzesten und längsten Laufzeit.

Als bestes Ergebnis wird also jenes genommen, bei dem die geringsten Kosten für die Erdungsanlagen auftreten. In diesem Beispiel ist dies Möglichkeit 7 mit zwei Erdungsanlagen, jeweils eine auf der ersten und eine auf der letzten Position mit je 1Ω als Widerstandswert. Abbildung 6-11 zeigt die beste Lösung des LVA als Graphen mit den zwei Erdungsanlagen, die rote Linie ist die maximale Grenzspannung von 65 Volt.

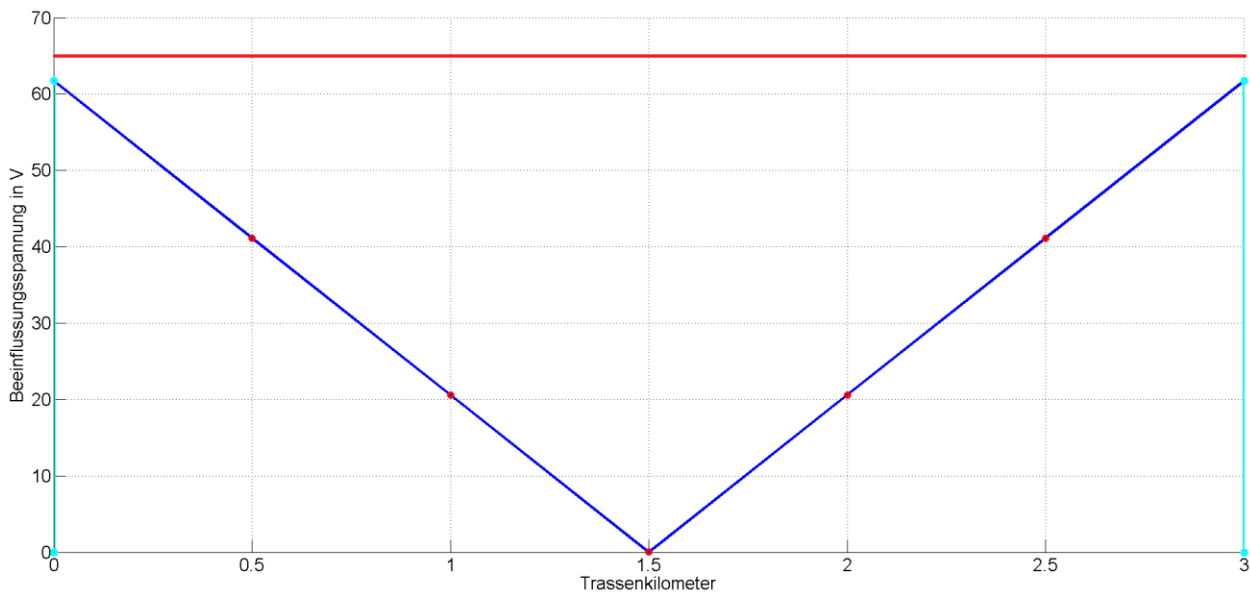


Abbildung 6-11: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und zwei Erdungsanlagen; Las-Vegas-Algorithmus, beste Lösung aus zehn verschiedenen Möglichkeiten

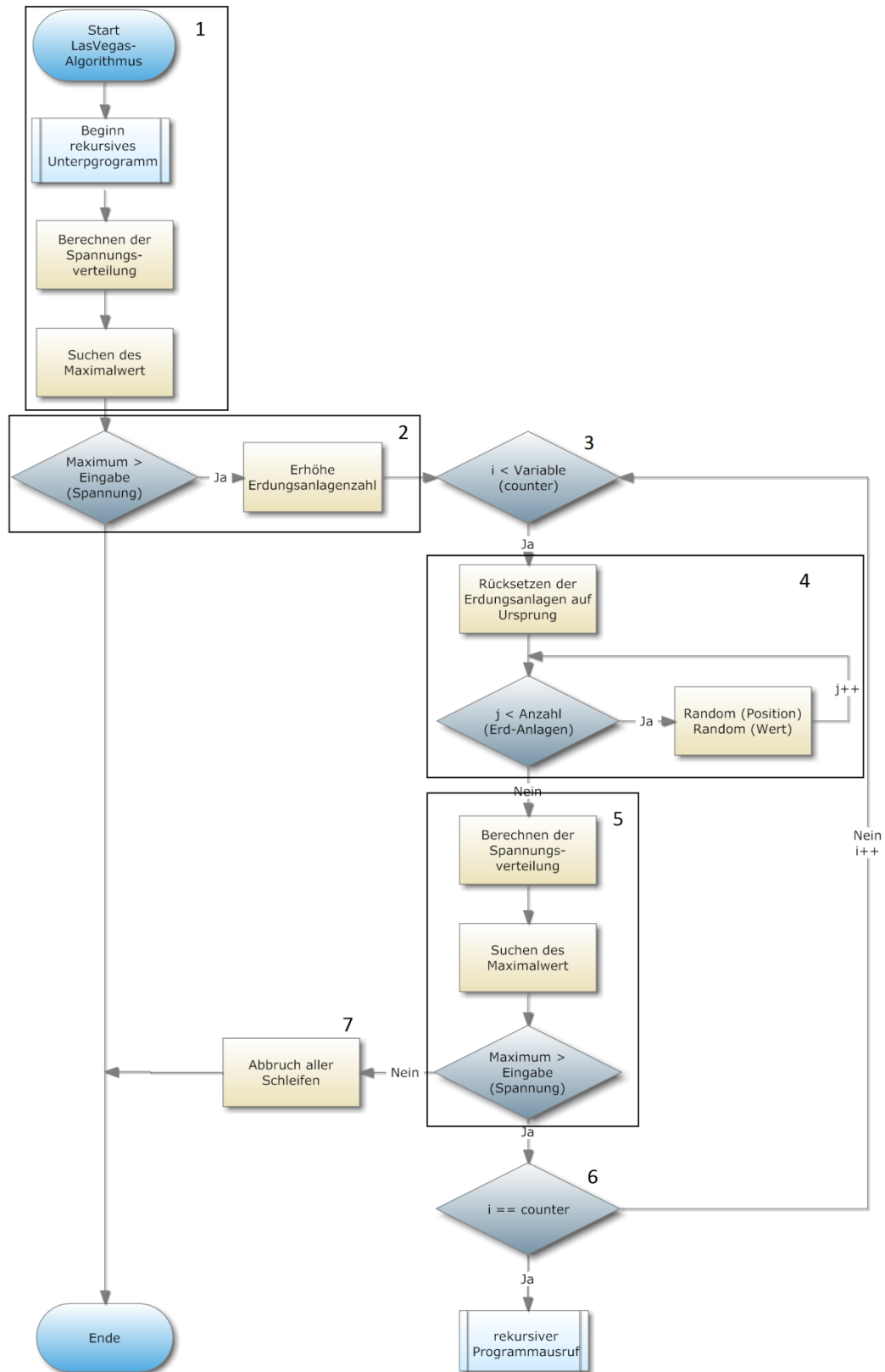


Abbildung 6-12: Flussdiagramm des Las-Vegas-Algorithmus

Abbildung 6-12 zeigt das Flussdiagramm des Las-Vegas-Algorithmus. Block (1) ist bereits vom vollständigen Such- und Optimierungsalgorithmus her bekannt. Hier wird der Algorithmus bzw. rekursive Teil des Algorithmus gestartet, anschließend werden die Spannungen an den Knotenpunkten berechnet und der Maximalwert herausgesucht. Wenn bei der Verzweigung in Block (2) die maximale berechnete Spannung größer ist als die eingegebene maximale Grenzspannung, wird die Anzahl der Erdungsanlagen erhöht (im ersten Durchlauf von null auf eins, etc.).

Ab Verzweigung (3) beginnt der eigentliche LVA. Die Variable „counter“ ist zuständig dafür, wie oft der Algorithmus mit einer bestimmten Erdungsanlagenanzahl versuchen darf, eine Lösung zu errechnen, die geringer als die maximale Grenzspannung ist. Die Variable „counter“ berechnet sich aus Anzahl der Erdungsanlagen, die derzeit verwendet werden dürfen, Anzahl der Knotenpunkte und Länge der Widerstandsreihe. Die Zählervariable i zählt alle Versuche mit und ist diese gleich groß wie die Variable „counter“, wird an der Verzweigung (6) der Ja-Zweig ausgeführt, d.h. der Algorithmus wird rekursiv aufgerufen und eine zusätzliche Erdungsanlage verwendet.

Wenn der Zähler i kleiner als die Variable „counter“ ist, wird in der Verzweigung (3) der Ja-Zweig ausgeführt. Im Block (4) werden zuerst alle Erdungsanlagen auf ihren Anfangszustand zurückgesetzt. Anschließend werden jeder Erdungsanlage ein zufälliger Wert aus der Widerstandsreihe sowie ein zufälliger Wert für die Position an der Rohrleitung (Knotenpunkt) zugewiesen. In Block (5) wird anschließend die neue Spannungsverteilung mit den Erdungsanlagen berechnet und der Maximalwert herausgesucht. Ist der Maximalwert trotz der Erdungsanlagen größer als die maximale Grenzspannung, wird ein neuer Versuch über den Ja-Zweig von Verzweigung (6) gestartet. Ist diese maximale Spannung hingegen kleiner als die maximale Grenzspannung, werden alle Schleifen abgebrochen (7) und der Algorithmus liefert eine Lösung. Diese erfüllt zwar das Primärziel aber nicht zwangsläufig das Sekundärziel und muss daher nicht die optimale Lösung sein.

Um ein besseres Ergebnis zu bekommen, muss dieser Algorithmus öfters ausgeführt werden. Wenn nun die zufälligen Parameter glücklich fallen, dann bekommt man ein optimales Ergebnis. Wie bereits gezeigt wurde, kann das beste Ergebnis bei unglücklicher Zufallswahl ziemlich weit vom optimalen Ergebnis entfernt sein.

6.3. Experten-Algorithmus

6.3.1. Entwicklung

In einer Vorarbeit des Institutes für Elektrische Anlagen der TU Graz [2] wurde das Programm „PipePotentials“ zur Bestimmung von Beeinflussungsspannungen entlang induktiv beeinflusster Rohrleitungen entwickelt. In diesem Programm ist sowohl die Position als auch der Widerstandswert der Erdungsanlagen rein vom Benutzer zu bestimmen. Im Zuge dieser Arbeit [2] werden Konzepte für ein mögliches Expertensystem angeführt. In der vorliegenden Arbeit wurde das Programm „PipePotentials“ herangezogen, Optimierungsalgorithmen erarbeitet und in das Programm implementiert. Des Weiteren wurde das Programm mit einer völlig neuen Oberfläche zur Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit (Usability) ausgestattet. Ein leistungsmäßiger Vergleich der erarbeiteten Algorithmen kann in Kapitel 7 gefunden werden.

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass Erdungsanlagen an den Punkten, wo die höchste Beeinflussungsspannung auftritt, am sinnvollsten sind.

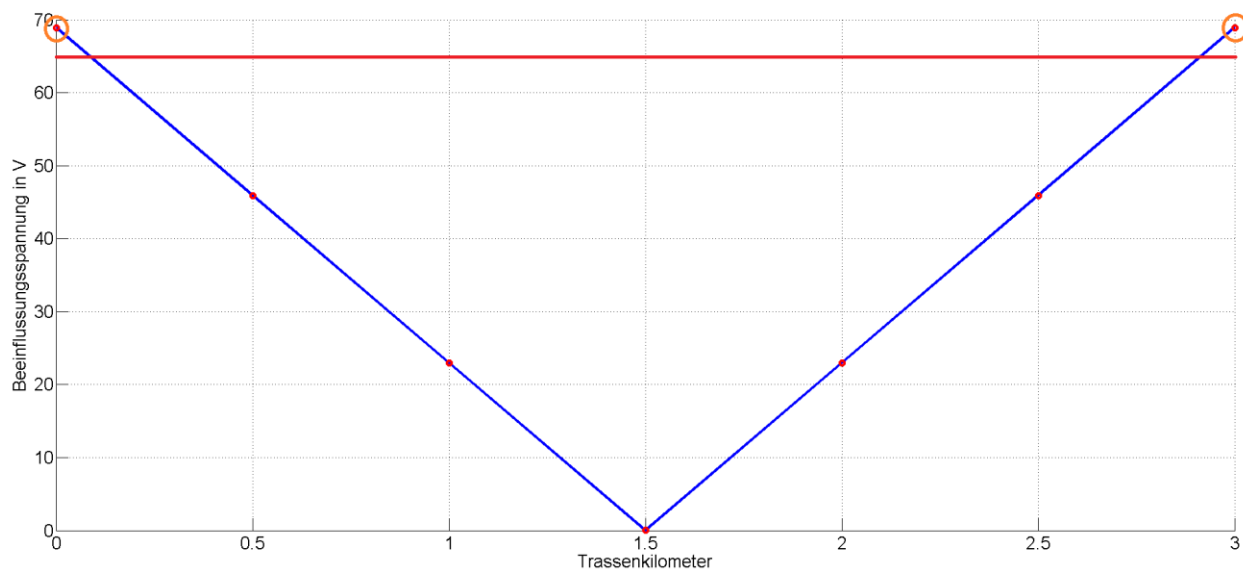


Abbildung 6-13: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten ohne Erdungsanlagen; Expertensystem – markierte Spitzen

Abbildung 6-13 zeigt, dass der Spannungsverlauf unter die rote Linie von 65 Volt zu optimieren ist. Die höchsten Rohrleitungsspannungen treten sowohl am Anfang als auch am Ende auf (orange Kreise), somit wären hier Erdungsanlagen am sinnvollsten. Daher werden an diesen Positionen manuell Erdungsanlagen hinzugefügt und deren Wert variiert, um ein optimales Ergebnis zu bekommen.

Der Experten-Algorithmus simuliert genau dieses Expertenwissen nach, um eine Lösung wesentlich schneller und bequemer zu berechnen oder um auf veränderte Parameter schneller reagieren zu können.

6.3.2. Beschreibung und Flussdiagramm des Experten-Algorithmus

Wie bereits oben beschrieben, soll der Algorithmus schnell und effizient eine Lösung berechnen. Die Idee ist nun, auf das Expertenwissen zurückzugreifen, und die Erdungsanlagen dort zu verwenden, wo die höchsten Beeinflussungsspannungen an der Rohrleitung auftreten.

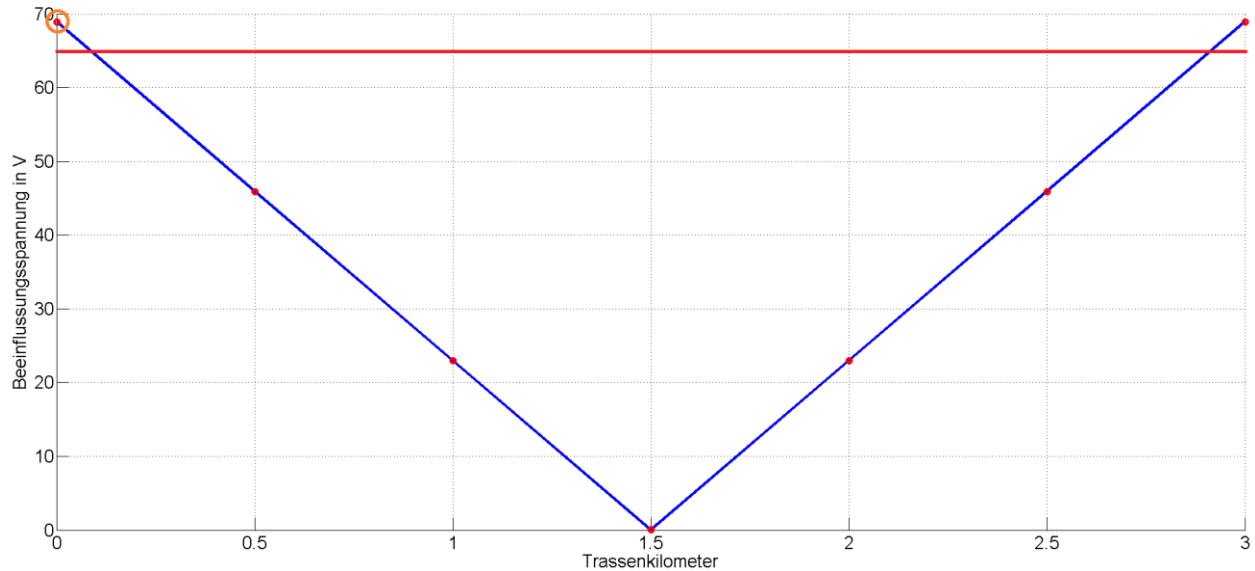


Abbildung 6-14: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten ohne Erdungsanlagen; Expertensystem – markierte höchste Spannung vorne

Der orange Kreis in Abbildung 6-14 zeigt das erste Maximum im Spannungsverlauf an der Rohrleitung an. Daher wird an diesem Punkt eine Erdungsanlage gesetzt, zunächst mit dem niedrigsten Wert.

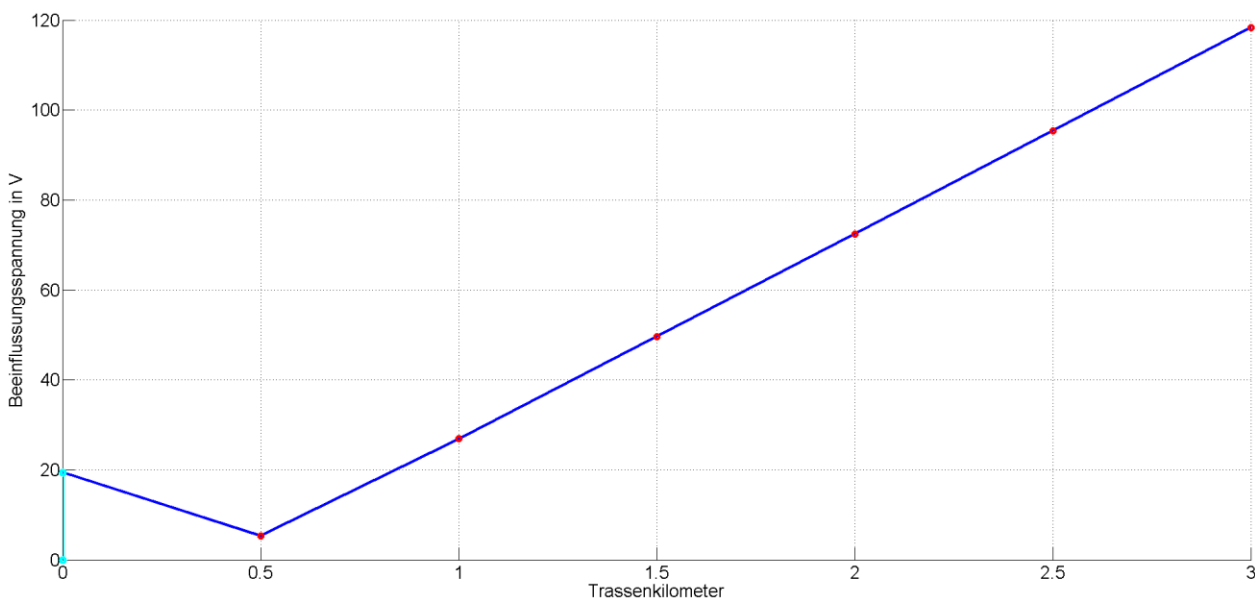


Abbildung 6-15: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und einer Erdungsanlagen; Expertensystem – die Erdungsanlage mit 4 Ω

Abbildung 6-15 zeigt den Spannungsverlauf, wenn eine Erdungsanlage mit 4Ω an der erste Position verwendet wird. Da aber mit dieser Anlage die Grenzspannung überschritten wird, werden alle Werte in der Widerstandsreihe durchvariiert und der Spannungsverlauf an der Rohrleitung berechnet.

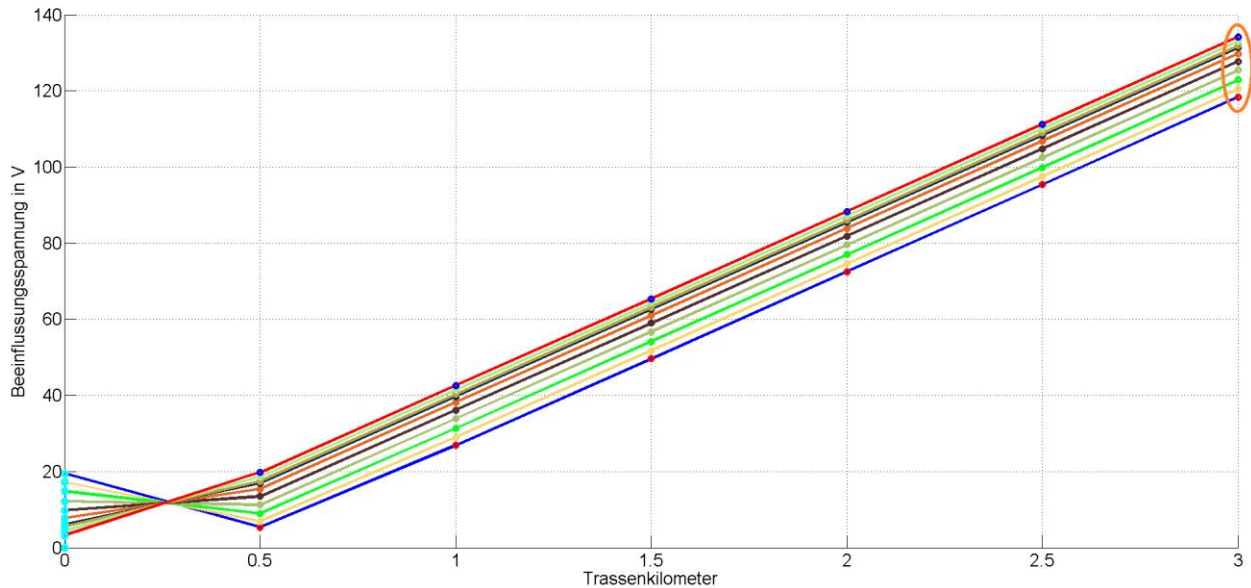


Abbildung 6-16: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und einer Erdungsanlagen; Expertensystem –Erdungsanlage mit allen Variationen der Widerstandsreihe

Abbildung 6-16 zeigt Spannungsverläufe, wenn die erste Erdungsanlage vom Wert variiert wird. Die blaue Linie mit den roten Knotenpunkten hat den niedrigsten Widerstandswert, die rote Linie mit den blauen Knotenpunkten den höchsten Wert bei der verwendeten Erdungsanlage. Damit ist eindeutig, dass ein niedriger Widerstandswert an der ersten Position die maximale Spannung an der letzten Position wesentlich erhöht.

Dadurch, dass ein symmetrisches Beispiel verwendet wird, hat eine einseitige Spannungsreduzierung mit einer Erdungsanlage einen gegenteiligen Effekt. Aus diesem Grund muss in diesem Beispiel eine zweite Anlage verwendet werden. Am sinnvollsten scheint also eine Erdungsanlage an der letzten Position, da hier die höchste Spannung auftritt (oranges Oval in Abbildung 6-16).

Da dieses Beispiel mit einer Erdungsanlage nicht optimiert werden kann, muss diese Anlage auf einen Widerstandswert fixiert werden. Nun stellt sich aber die Frage, welcher Widerstandswert am sinnvollsten für die bereits bestehende erste Erdungsanlage ist. Der höchste Wert von 4Ω wird zweifellos die geringsten Kosten für die Spannungsoptimierung bedeuten. Zu überprüfen ist jedoch, ob dieser Widerstandswert ausreicht, um den Spannungsverlauf unter die Grenze von 65 Volt zu optimieren.

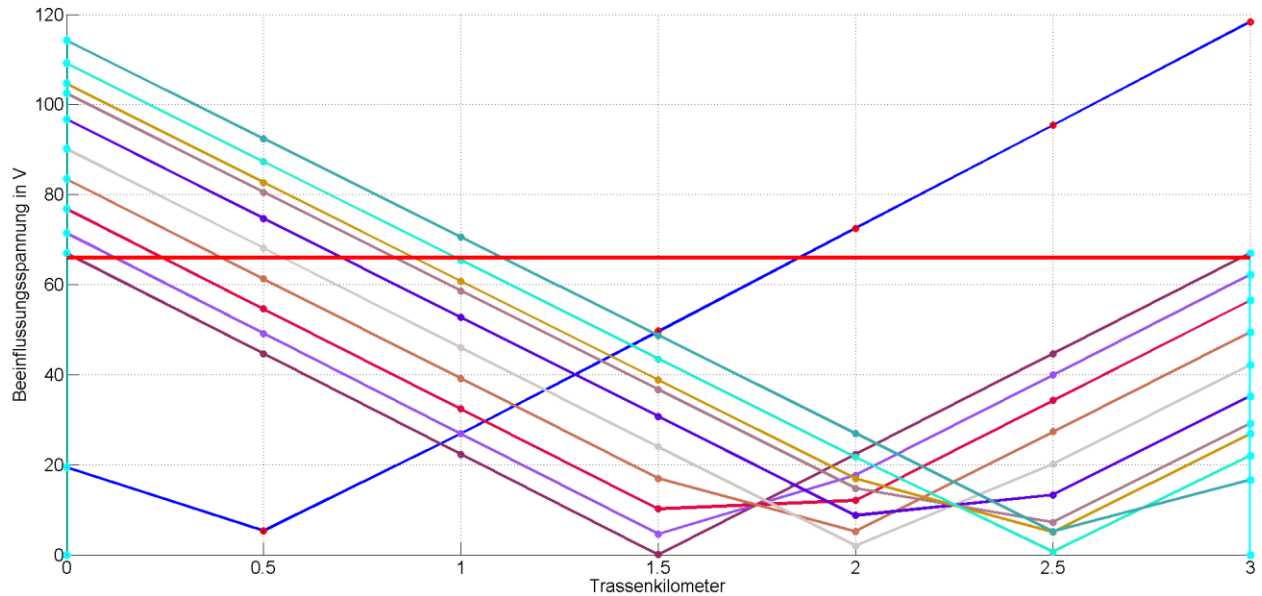


Abbildung 6-17: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und zwei Erdungsanlagen; Expertensystem – erste Erdungsanlage auf 4 Ω , zweite mit allen Variationen der Widerstandsreihe

Wenn die erste Erdungsanlage auf einem Wert von 4 Ω fixiert und die zweite Erdungsanlage mit allen Werten der Widerstandsreihe variiert wird, ist in Abbildung 6-17 ersichtlich, dass kein Spannungsverlauf unter 65 Volt optimiert werden kann. Tatsächlich ist bei diesem Beispiel bekannt, dass die erste Erdungsanlage einen Widerstandswert kleiner gleich 1,7 Ω haben muss, damit die zweite Erdungsanlage anhand der Widerstandsreihe so optimiert werden kann, dass sich der Spannungsverlauf an der Rohrleitung unter 65 Volt befindet.

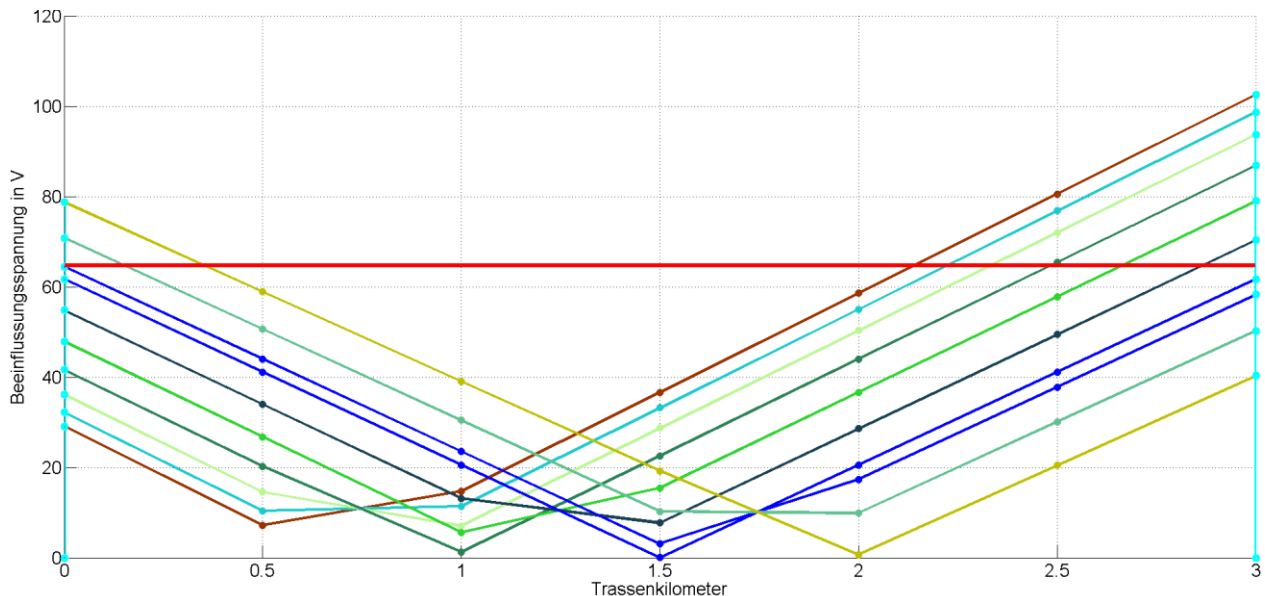


Abbildung 6-18: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und zwei Erdungsanlagen; Expertensystem – erste Erdungsanlage auf 1 Ω , zweite mit allen Variationen der Widerstandsreihe

In Abbildung 6-18 wird die erste Erdungsanlage auf einen Wert von 1Ω fixiert, welcher im Programm auch als Standard-Vorgabewert eingetragen ist. Der Benutzer kann diesen Wert über das Programm verändern (siehe Kapitel 5.5, Punkt (3)).

Nun befinden sich zwei Spannungsverläufe (blaue Kurven) unter der geforderten Grenzspannung von 65 Volt. Bei beiden ist die erste Erdungsanlage auf 1Ω fixiert, die zweite Erdungsanlage hat einen Wert von 1 bzw. $0,9 \Omega$. Da aber die Kosten für die Spannungsverlaufsoptimierung so gering wie möglich sein sollen wird für die zweite Erdungsanlage der Wert von 1Ω verwendet, der Spannungsverlauf ist in Abbildung 6-19 dargestellt.

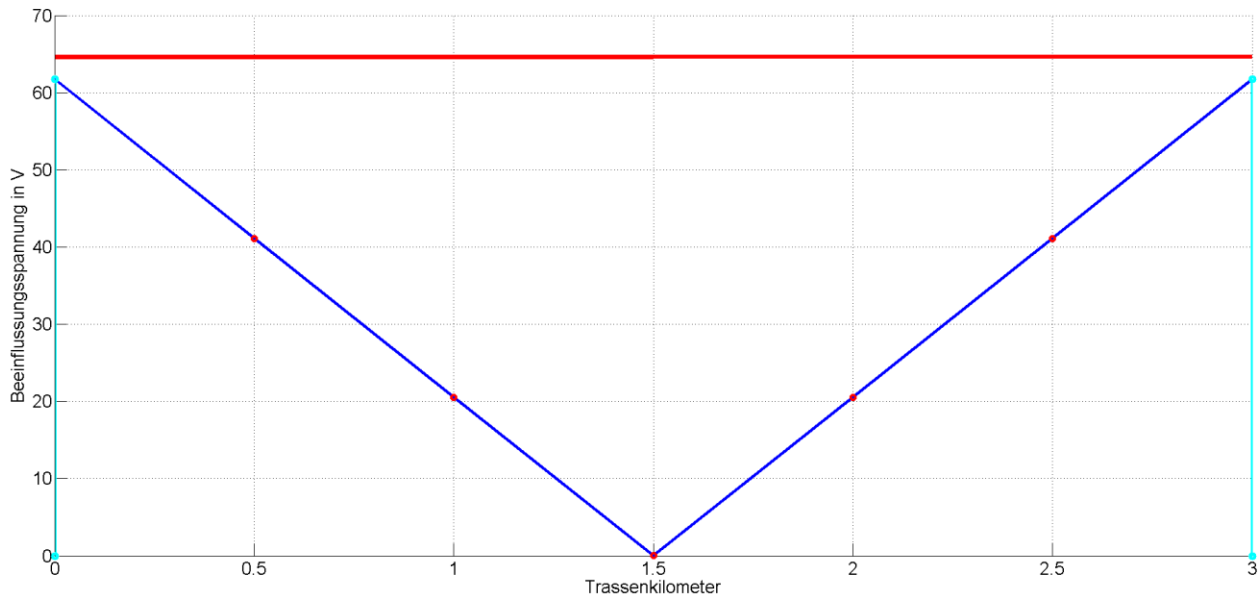


Abbildung 6-19: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und zwei Erdungsanlagen; Expertensystem - finales optimiertes Ergebnis

Die Kosten für die Optimierung betragen also **40000 GE**. Durch Optimierung des Standard-Vorgabewertes können die Kosten noch gesenkt werden, bei Verwendung von zwei $1,7 \Omega$ Erdungsanlagen betragen diese dann **23529 GE**. Um ein besseres Ergebnis zu erreichen, muss jedoch mehr Zeit vom Benutzer aufgewendet werden.

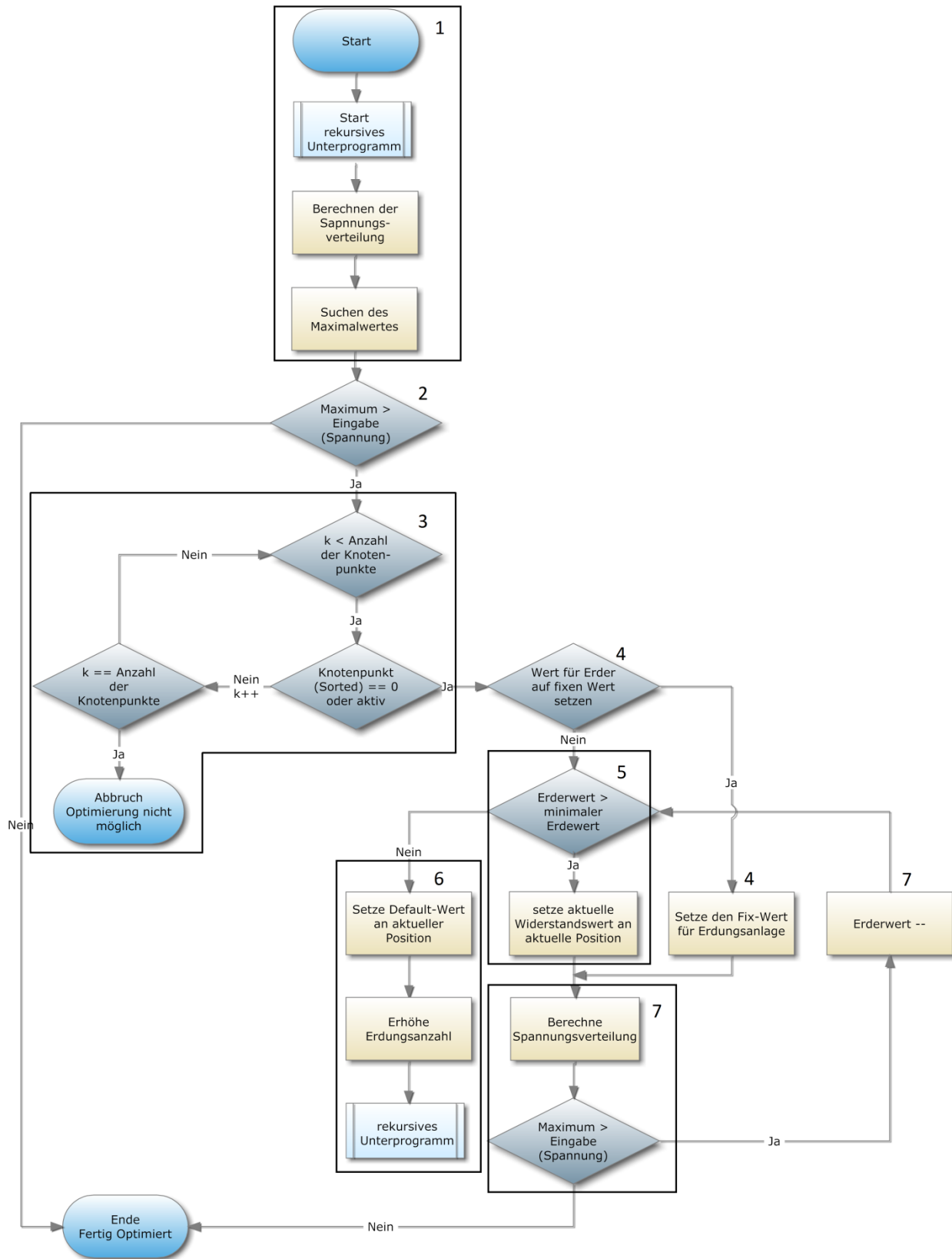


Abbildung 6-20: Flussdiagramm für den Experten-Algorithmus

Block (1) ist bereits von den anderen Algorithmen bekannt. Bei der Verzweigung (2) wird überprüft, ob der maximale Wert des Spannungsverlaufs an der Rohrleitung höher als die eingegebene maximale Grenzspannung ist. Ist das nicht der Fall, wird der Algorithmus sofort beendet, da keine Optimierung notwendig ist.

Sollte die maximale Spannung höher als die Grenzspannung sein, wird am Knotenpunkt mit der höchsten Beeinflussungsspannung überprüft, ob bereits eine Erdungsanlage an dieser Stelle verbaut ist (Erdungswert > 0) bzw. ob an dieser Stelle eine Erdungsanlage verwendet werden darf (weil z.B. die geografischen Bedingungen an diesem Ort nicht geeignet sind). Ist es nicht möglich an dieser Position eine Erdungsanlage zu platzieren, wird am nächsten Knotenpunkt mit dem nächstniedrigen Spannungswert versucht, eine Erdungsanlage zu verwenden. Mit jedem versuchten Knotenpunkt wird die Zählvariable k erhöht. Hat diese dann den gleichen Wert wie die Anzahl der Knotenpunkte, ist es an keiner Position möglich, eine Erdungsanlage zu verwenden und der Algorithmus bricht die Optimierung ab, da dies mit der geforderten maximalen Grenzspannung nicht möglich ist (Block 3).

Wenn es nun an der Position k möglich ist, eine Erdungsanlage zu platzieren, geht es weiter zu Verzweigung (4), an der überprüft wird, ob der Benutzer einen fixen Wert für die Erdungsanlage vorgegeben hat oder ob eine Widerstandsreihe dafür verwendet wird. Soll ein fixer Widerstandswert verwendet werden, wird eine Erdungsanlage mit diesem Wert an Position k platziert (1). Anschließend wird Block 7 ausgeführt, in welchem die neue Spannungsverteilung entlang der Rohrleitung berechnet wird.

Wird aber eine Widerstandsreihe verwendet, wird Block (5) ausgeführt. An der aktuellen Position k wird eine Erdungsanlage mit dem höchsten Wert der Widerstandsreihe platziert, anschließend wird über Block (7) die neue Spannungsverteilung berechnet. Sollte die maximale Spannung trotzdem über der maximalen Grenzspannung liegen, wird eine Anlage mit dem nächstniedrigeren Widerstandswert an dieser Position k versucht. Sollte jedoch die maximale Spannung unter dem maximalen Grenzwert liegen, wird der Algorithmus beendet und ein Ergebnis wird in der graphischen Oberfläche angezeigt.

Sollte nach mehreren Durchläufen kein nächstniedriger Widerstandswert mehr verfügbar sein, wird bei Verzweigung (5) der Nein-Zweig ausgeführt, und an der aktuellen Position k wird eine Erdungsanlage mit einem vorgegebenen fixen Widerstandswert platziert (Block 6). Anschließend wird eine zusätzliche Erdungsanlage verwendet und der Algorithmus wird rekursiv mit den bereits vorhandenen Erdungsanlagen neu gestartet.

7 VERGLEICH DER VERWENDETEN ALGORITHMEN

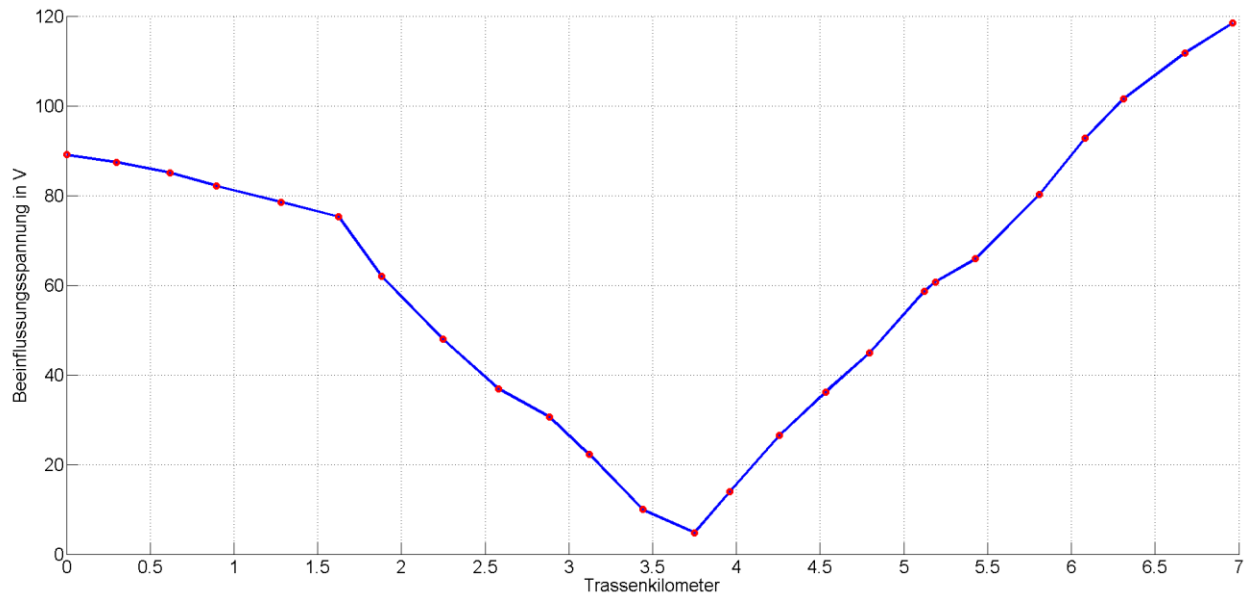


Abbildung 7-1: Analyse der Algorithmen, keine Optimierung

Für den Vergleich der verwendeten Algorithmen wird das Beispiel in Abbildung 7-1 verwendet. In diesem Graphen ist der Spannungsverlauf einer Rohrleitung abgebildet, welcher zwei Spannungsspitzen, eine am Beginn und eine am Ende hat. Wie bereits in den Erklärungen zu den unterschiedlichen Algorithmen gezeigt wird, ist es bei einer ungünstigen Positionierung der ersten Erdungsanlage notwendig, eine zweite Erdungsanlage zu verwenden. Diese Aufgabe soll mit den unterschiedlichen Algorithmen, sowohl mit der Widerstandsreihe als auch mit einem fixen Widerstandswert von 1Ω optimiert werden. Dazu werden verschiedene maximale Grenzspannungen verwendet, um Laufzeit, Kosten für Erdungsanlagen und berechnete Lösungen zu analysieren.

Es werden dazu folgende Algorithmen verwendet um diese Analyse durchzuführen:

- Experten-Algorithmus mit einem Vorgabe-Widerstandswert von 1Ω .
- Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus (VSOA) ohne Datenfilter; Es werden alle 25 Knotenpunkte berücksichtigt.
- Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus (VSOA) mit Datenfilter; Der Datenfilter verwendet die 15 Knotenpunkte mit den höchsten Knotenpunkt-Spannungen.
- Las-Vegas-Algorithmus (LVA); Dieser wird zehnmal ausgeführt, anschließend wird sowohl das beste als auch das schlechteste Ergebnis analysiert.

Die komplette, theoretische Analyse startet bei der maximalen Grenzspannung von 118 Volt. Das Ende der Analyse ist bei verschiedenen unteren maximalen Grenzspannungen erreicht, da sich die Laufzeit bei niedrigeren Spannungen teilweise empfindlich erhöht.

Die maximalen Grenzspannungen sind zum Teil unterschiedlich groß gewählt, weil an diesen Punkten besondere Ereignisse passieren. Darunter fallen u.a. der Wechsel der Anzahl von Erdungsanlagen oder Laufzeitsprünge.

Die Analyse in Kapitel 7.1 und 7.2 betrachtet die verschiedenen Spannungsverläufe der einzelnen Algorithmen bei unterschiedlichen maximalen Grenzspannungen. Wie deutlich zu erkennen ist, sind die Spannungsverläufe sehr unterschiedlich. Diese werden nur durch die Verortung, also von Position und Widerstandswert der Erdungsanlagen beeinflusst. Die Kosten für die jeweiligen Lösungen hängen wiederum von der Anzahl der Erdungsanlagen sowie deren Widerstandswert ab. Die Spannungsverläufe finden sich im Anhang A und Anhang B, die dazugehörigen Lösungen für die Widerstandsreihe werden in Kapitel 7.1, die für den fixen Widerstandswert in Kapitel 7.2 betrachtet. Die Laufzeiten der Algorithmen werden gesondert betrachtet.

Um auch die Richtlinien TE30 und CEN/TS 15280 zu betrachten, wird die Optimierung des Spannungsverlaufes von der praktischen Seite betrachtet. Dazu werden die Grenzspannung von 65 bzw. 10 Volt verwendet.

Für den Spannungsverlauf in den Abbildung 7-1 bis Abbildung 7-9 werden folgende Systemparameter verwendet:

- Systemfrequenz: 50 Hz
- Reduktionsfaktor: 1
- induzierender Strom:
 - theoretische Untersuchung: 1000 Ampere
 - praktische Untersuchung – TE30: 1000 Ampere (Thermischer Maximalstrom)
 - praktische Untersuchung – CEN/TS 15280: 200 Ampere (Strom bei Normalbelastung)
- Umhüllungswiderstand (Isolationswiderstand) der Rohrleitung: 100 k Ω
- spezifischer Erdwiderstand: 100 Ω

Wenn keine Erdungsanlage verwendet wird, beträgt die maximale Spannung mit diesen Systemparametern und einem Strom von 1000 Ampere 118,4 Volt, welcher sich bei Trassenkilometer 7 befindet. Wenn ein Strom von 200 Ampere verwendet wird, liegt die Spannung von 23,68 Volt an derselben Position.

7.1. Verwendung der Widerstandsreihe

7.1.1. Analyse der berechneten Lösungen für das Beispiel

- Vorgegebene obere Grenzspannung: 118 Volt

Grenzspannung: 118 Volt Spannungsverlauf: Abbildung A-1 auf Seite 109	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus	4 Ω (4 km)	5000 GE
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus mit Datenfilter	4 Ω (0 km); 4 Ω (7 km)	10000 GE
Las-Vegas-Algorithmus (bestes Ergebnis)	4 Ω (4 km)	5000 GE
Las-Vegas-Algorithmus (schlechtestes Ergebnis)	0,5 Ω (4 km)	40000 GE
Experten-Algorithmus	4 Ω (0 km); 1 Ω (7 km)	25000 GE

Tabelle 7-1: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 118 Volt

Für die Grenzspannung von 118 wird nur eine hochohmige Erdungsanlage benötigt. Der VSOA sowie der beste Fall des LVA zeigen das Optimum mit 5000 GE für die Erdungsanlage. Die schlechteste Lösung des LVA verwendet ebenfalls eine Erdungsanlage, diese verursacht aber hohe Kosten, da der Widerstandswert sehr niederohmig ist. Der VSOA mit Datenfilter und der Experten-Algorithmus berücksichtigen aufgrund ihrer Optimiercharakteristiken den tiefsten Punkt nicht und verwenden daher zwei Erdungsanlagen am Anfang und Ende der Rohrleitung.

- Vorgegebene obere Grenzspannung: 104,7 Volt

Grenzspannung: 104,7 Volt Spannungsverlauf: Abbildung A-2 auf Seite 109	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus	0,5 Ω (4,3 km)	40000 GE
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus mit Datenfilter	4 Ω (0 km); 4 Ω (7 km)	10000 GE
Las-Vegas-Algorithmus (bestes Ergebnis)	4 Ω (1,9 km); 1,7 Ω (5,4 km)	16765 GE
Las-Vegas-Algorithmus (schlechtestes Ergebnis)	0,5 Ω (1,6 km); 0,5 Ω (6,3 km)	80000 GE
Experten-Algorithmus	3,4 Ω (0 km); 1 Ω (7 km)	25882 GE

Tabelle 7-2: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 104,7 Volt

Die Grenzspannung von 104,7 Volt ist bei Verwendung von nur einer Erdungsanlage das untere Limit. Der VSOA kann dieses Ergebnis erzielen, muss aber eine sehr niederohmige Erdungsanlage verwenden. Die beste Lösung ist die Verwendung von zwei hochohmigen Erdungsanlagen, da diese die geringsten Gesamtkosten von 10000 GE haben. Diese Lösung kann der VSOA mit Datenfilter erfüllen. Im Gegensatz dazu verwendet der LVA immer zwei Erdungsanlagen, da er die Anzahl der maximalen Versuche bei der

Verwendung von einer Erdungsanlage überschreitet. Das beste Ergebnis nähert sich einer optimalen Lösung, ist aber um 67 % teurer. Auf der anderen Seite kann durch den randombasierenden Algorithmus der schlechteste Fall durch die Verwendung von zwei Erdungsanlagen ebenfalls auftreten. Dann betragen die Kosten für die Erdungsanlagen das acht-fache des Optimums. Der Experten-Algorithmus verwendet ebenfalls zwei Erdungsanlagen, aber die Errichtungskosten betragen das Doppelte der besten Lösung. Diese erhöhten Kosten werden vorwiegend durch den Vorgabe-Widerstandswert von 1 Ω verursacht.

- **Vorgegebene obere Grenzspannung: 104,6 Volt, 100 Volt, 70 Volt, 50 Volt**

Grenzspannung: 104,6 Volt Spannungsverlauf: Abbildung A-3 auf Seite 110	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus	4 Ω (0 km); 4 Ω (7 km)	10000 GE
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus mit Datenfilter	4 Ω (0 km); 4 Ω (7 km)	10000 GE
Las-Vegas-Algorithmus (bestes Ergebnis)	2,8 Ω (3,4 km); 3,4 Ω (4,8 km)	13025 GE
Las-Vegas-Algorithmus (schlechtestes Ergebnis)	0,7 Ω (1,3 km); 0,5 Ω (4,8 km)	68571 GE
Experten-Algorithmus	3,4 Ω (0 km); 1 Ω (7 km)	25882 GE

Tabelle 7-3: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 104,6 Volt

Grenzspannung: 100 Volt Spannungsverlauf: Abbildung A-4 auf Seite 110	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus	4 Ω (0 km); 4 Ω (7 km)	10000 GE
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus mit Datenfilter	4 Ω (0 km); 4 Ω (7 km)	10000 GE
Las-Vegas-Algorithmus (bestes Ergebnis)	2,8 Ω (0,3 km); 3,4 Ω (5,8 km)	13025 GE
Las-Vegas-Algorithmus (schlechtestes Ergebnis)	0,7 Ω (2,9 km); 0,5 Ω (5,1 km)	68571 GE
Experten-Algorithmus	2,8 Ω (0 km); 1 Ω (7 km)	27143 GE

Tabelle 7-4: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 100 Volt

Grenzspannung: 70 Volt Spannungsverlauf: Abbildung A-5 auf Seite 111	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus	2,2 Ω (0 km); 2,2 Ω (7 km)	18182 GE
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus mit Datenfilter	2,2 Ω (0 km); 2,2 Ω (7 km)	18182 GE
Las-Vegas-Algorithmus (bestes Ergebnis)	0,9 Ω (0,6 km); 1,3 Ω (7 km)	37067 GE
Las-Vegas-Algorithmus (schlechtestes Ergebnis)	0,5 Ω (1, km 9); 0,5 Ω (7 km)	80000 GE
Experten-Algorithmus	1,3 Ω (0 km); 1 Ω (7 km)	35385 GE

Tabelle 7-5: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 70 Volt

Grenzspannung: 50 Volt Spannungsverlauf: Abbildung A-6 auf Seite 111	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus	0,9 Ω (0,6 km); 1 Ω (7 km)	42222 GE
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus mit Datenfilter	0,9 Ω (0,6 km); 1 Ω (7 km)	42222 GE
Las-Vegas-Algorithmus (bestes Ergebnis)	0,9 Ω (0,6 km); 0,9 Ω (7 km)	44444 GE
Las-Vegas-Algorithmus (schlechtestes Ergebnis)	0,5 Ω (0,6 km); 0,5 Ω (6,7 km)	80000 GE
Experten-Algorithmus	0,7 Ω (0 km); 1 Ω (7 km)	48571 GE

Tabelle 7-6: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 50 Volt

In Tabelle 7-3 bis Tabelle 7-6 wird gezeigt, dass die verschiedenen Algorithmen ein gleiches Verhalten bei den vier unterschiedlichen maximalen Grenzspannungen 104,6, 100, 70 und 50 Volt aufweisen. Um die maximalen Grenzspannungen nicht zu überschreiten, verwenden alle Algorithmen zwei Erdungsanlagen. Sinkt die Grenzspannung, werden die Erdungsanlagen bei steigenden Kosten niederohmiger. Der vollständige Such- und Optimieralgorithmus (sowohl ohne als auch mit Datenfilter) erzielt dabei immer die beste Lösung. Im Gegensatz dazu weisen LVA (bestes Ergebnis) und Experten-Algorithmus höhere Gesamtkosten für die Erdungsanlagen auf. Die Kostendifferenz wird bei kleineren Grenzspannungen niedriger, bis diese bei 50 Volt nur noch maximal 15 % beträgt.

- **Vorgegebene obere Grenzspannung: 36,5 Volt**

Grenzspannung: 36,5 Volt Spannungsverlauf: Abbildung A-7 auf Seite 112	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus	0,5 Ω (0,9 km); 0,5 Ω (7 km)	80000 GE
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus mit Datenfilter	0,5 Ω (0,9 km); 0,5 Ω (7 km)	80000 GE
Las-Vegas-Algorithmus (bestes Ergebnis)	0,5 Ω (0,9 km); 0,5 Ω (7 km)	80000 GE
Las-Vegas-Algorithmus (schlechtestes Ergebnis)	0,5 Ω (0,3 km); 0,9 Ω (2,6 km); 0,5 Ω (6,7 km)	102222 GE
Experten-Algorithmus	1 Ω (0 km); 1 Ω (1,6 km); 1,3 Ω (6,7 km); 1 Ω (7 km)	75385 GE

Tabelle 7-7: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 36,5 Volt

Bei der Verwendung von zwei Erdungsanlagen beträgt die untere maximale Grenzspannung 36,5 Volt. VSOA und LVA (bestes Ergebnis) führen mit zwei Erdungsanlagen zur selben Lösung, wobei diese aber nicht die kostengünstigste ist. Der Experten-Algorithmus verwendet vier Erdungsanlagen, davon drei mit dem Standard-Vorgabewert und erzielt dadurch eine um 6 % günstigere Lösung. Hier ist klar ersichtlich, dass durch die Verwendung von mehreren Erdungsanlagen mit einem höheren Widerstandswert eine bessere Lösung erzielt werden kann als mit wenigen, aber niederohmigen Erdungsanlagen.

- **Vorgegebene obere Grenzspannung: 36,4 Volt, 35 Volt**

Grenzspannung: 36,4 Volt Spannungsverlauf: Abbildung A-8 auf Seite 112	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus	0,5 Ω (0,9 km); 4 Ω (6,7 km); 0,7 Ω (7 km)	73571 GE
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus mit Datenfilter	0,5 Ω (0,9 km); 4 Ω (6,7 km); 0,7 Ω (7 km)	73571 GE
Las-Vegas-Algorithmus (bestes Ergebnis)	1 Ω (0,3 km); 1,3 Ω (1,6 km); 0,5 Ω (7 km)	75385 GE
Las-Vegas-Algorithmus (schlechtestes Ergebnis)	0,5 Ω (0 km); 0,7 Ω (3,1 km); 0,5 Ω (7 km)	108571 GE
Experten-Algorithmus	1 Ω (0 km); 1 Ω (1,6 km); 1,3 Ω (6,7 km); 1 Ω (7 km)	75385 GE

Tabelle 7-8: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 36,4 Volt

Grenzspannung: 35 Volt Spannungsverlauf: Abbildung A-9 auf Seite 113	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus	1,3 Ω (0 km); 1 Ω (1,6 km); 0,5 Ω (7 km)	75385 GE
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus mit Datenfilter	1,3 Ω (0 km); 1 Ω (1,6 km); 0,5 Ω (7 km)	75385 GE
Las-Vegas-Algorithmus (bestes Ergebnis)	2,8 Ω (0,9 km); 0,5 Ω (1,3 km); 0,5 Ω (7 km)	87143 GE
Las-Vegas-Algorithmus (schlechtestes Ergebnis)	0,7 Ω (0 km); 0,5 Ω (1,9 km); 0,5 Ω (7 km)	108571 GE
Experten-Algorithmus	1 Ω (0 km); 1 Ω (1,6 km); 1,3 Ω (6,7 km); 1 Ω (7 km)	75385 GE

Tabelle 7-9: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 35 Volt

Bei diesen Grenzspannungen liefert wiederum der vollständige Such- und Optimieralgorithmus die kostengünstigsten Lösungen. Der Experten-Algorithmus hat die gleichen (bei 35 Volt) bzw. nahezu gleichen (bei 36,4 Volt, 2,4 % höher) Gesamtkosten trotz der Verwendung von vier Erdungsanlagen, da diese im Vergleich zu den anderen Algorithmen geringfügig hochohmiger sind. Der LVA verwendet bei allen zehn Versuchen ebenfalls drei Erdungsanlagen. Bei einer Grenzspannung von 35 Volt ist, aufgrund der ungünstigen Zufallszahlen, im besten Fall der Abstand zur optimalen Lösung höher (11758 GE bzw. 15 % höher). Trotzdem führt der LVA mit seinem schlechtesten Ergebnis nicht zum Worst-Case-Fall (drei 0,5 Ω Erdungsanlagen mit 120000 GE Gesamtkosten). Hier ist klar zu erkennen, dass die Lösungen durch die Zufallszahlen einer Normalverteilung folgen.

- **Vorgegebene obere Grenzspannung: 31 Volt, 29,6 Volt**

Grenzspannung: 31 Volt Spannungsverlauf: Abbildung A-10 auf Seite 113	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus	1 Ω (0 km); 0,9 Ω (1,6 km); 0,5 Ω (7 km)	82222 GE
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus mit Datenfilter	1 Ω (0 km); 0,9 Ω (1,6 km); 0,5 Ω (7 km)	82222 GE
Las-Vegas-Algorithmus (bestes Ergebnis)	0,9 Ω (0,3 km); 0,9 Ω (1,6 km); 0,5 Ω (7 km)	84444 GE
Las-Vegas-Algorithmus (schlechtestes Ergebnis)	0,5 Ω (0 km); 0,5 Ω (0,9 km); 0,5 Ω (7 km)	120000 GE
Experten-Algorithmus	1 Ω (0 km); 1 Ω (1,3 km); 1 Ω (1,6 km); 4 Ω (6,3 km); 1 Ω (6,7 km); 1 Ω (7 km)	105000 GE

Tabelle 7-10: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 31 Volt

Grenzspannung: 29,6 Volt Spannungsverlauf: Abbildung A-11 auf Seite 114	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus	0,5 Ω (0, km 3); 0,5 Ω (0,6 km); 0,5 Ω (7 km)	120000 GE
Vollständiger Such- und Optimieralgorithmus mit Datenfilter	0,5 Ω (0,3 km); 0,5 Ω (0,6 km); 0,5 Ω (7 km)	120000 GE
Las-Vegas-Algorithmus (bestes Ergebnis)	0,9 Ω (0,3 km); 0,9 Ω (1,6 km); 0,5 Ω (6,7 km); 1,7 Ω (7 km)	102558 GE
Las-Vegas-Algorithmus (schlechtestes Ergebnis)	0,5 Ω (0,3 km); 0,5 Ω (0,6 km); 0,5 Ω (7 km)	120000 GE
Experten-Algorithmus	1 Ω (0 km); 1 Ω (1,3 km); 1 Ω (1,6 km); 2,2 Ω (6,3 km); 1 Ω (6,7 km); 1 Ω (7 km)	109091 GE

Tabelle 7-11: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 29,6 Volt

Der Experten-Algorithmus verwendet bereits sechs Erdungsanlagen und kann bei 31 Volt nicht überzeugen, da hier die beste Lösung 28% weniger kostet. Bei 29,6 Volt nähert er sich aber der besten Lösung. Bei 31 Volt berechnet der VSOA (mit und ohne Datenfilter) die beste Lösung mit 82222 GE. Dazu werden aber nur drei Erdungsanlagen, die Hälfte als beim Experten-Algorithmus, verwendet. Der Las-Vegas-Algorithmus verwendet bei 31 Volt dieselbe Anzahl an Erdungsanlagen, welche aber geringfügig teurer sind. Im Gegensatz dazu hat dieser Algorithmus bei der Grenzspannung von 29,6 Volt die beste Lösung, verwendet aber vier Erdungsanlagen. Bei beiden Grenzspannungen tritt jedoch auch der Worst-Case-Fall für drei Erdungsanlagen mit 120000 GE ein. Die Grenzspannung von 29,6 Volt ist auch die untere Maximalspannung für drei Erdungsanlagen, daher verwendet der VSOA drei niederohmige Anlagen, um diese Spannung zu erreichen.

7.1.2. Kostenanalyse der Lösung bei der jeweiligen Grenzspannung

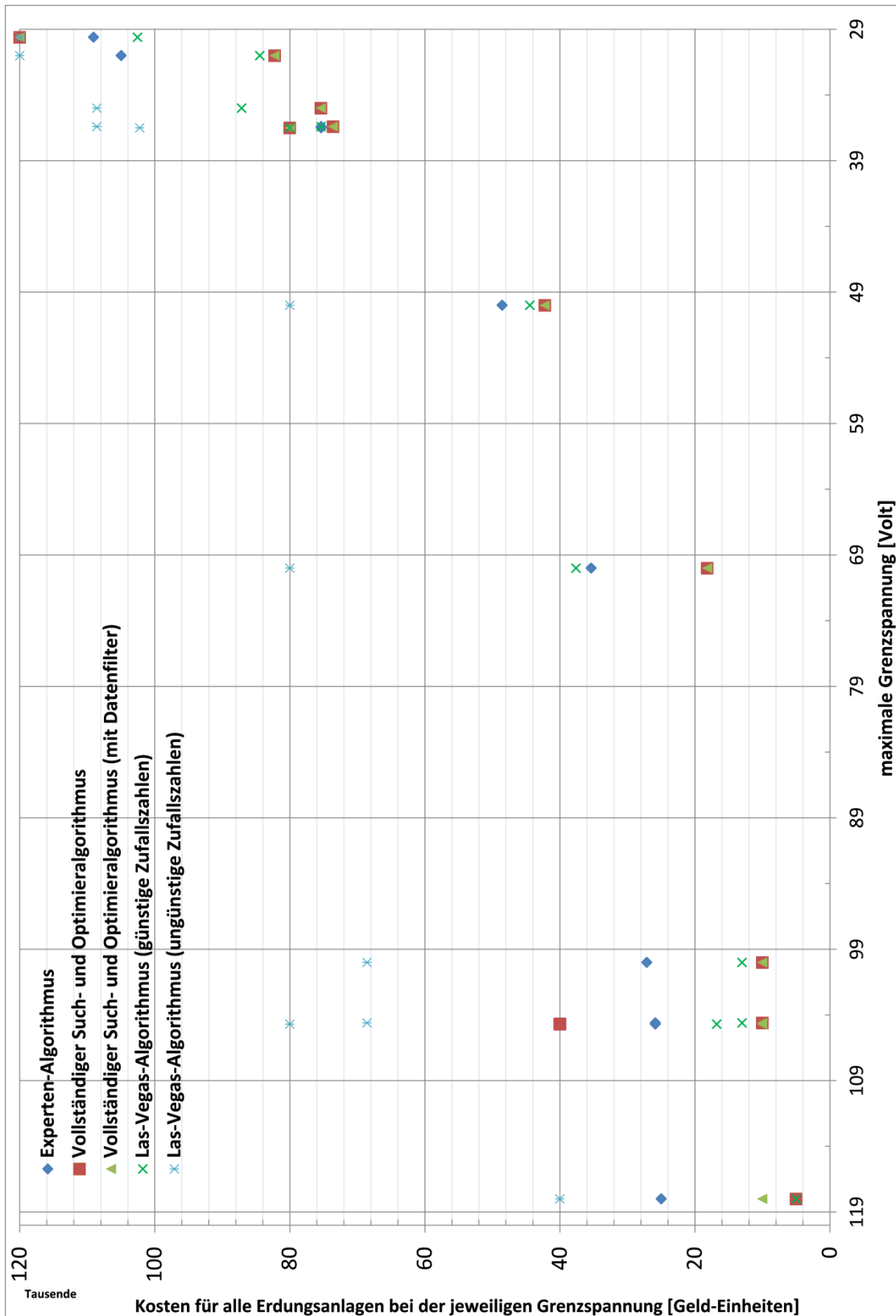


Abbildung 7-2: Kostenanalyse der berechneten Lösungen der Algorithmen bei Verwendung der Widerstandsreihe

Die Kosten für die Errichtung der Erdungsanlagen wird in Abbildung 7-2 als Graph dargestellt. Die Algorithmen berechnen aufgrund ihrer Charakteristika häufig verschiedene Lösungen, wodurch unterschiedliche Gesamtkosten für die Errichtung der Erdungsanlagen entstehen. Hierbei zeigen alle Algorithmen einen ähnlichen Anstieg der Kosten, die einzigen erwähnenswerten Abweichungen befinden sich bei Grenzspannungen, bei denen sich die Anzahl an Erdungsanlagen ändert. Im betrachteten Spannungsbereich liegen diese beim Sprung von 104,7 auf 104,6 und 36,5 auf 36,4 Volt. So ist es z.B. bei 104,7 Volt möglich, eine sehr niederohmige Erdungsanlage ($0,5 \Omega$) mit den Kosten von 40000 GE zu verwenden, um das Ziel zu erreichen. Bei einer maximalen Grenzspannung von 104,6 Volt ist es aber möglich, zwei hochohmige Erdungsanlagen (jeweils 4Ω) mit den Gesamtkosten von 10000 GE zu errichten. Die Kosten beziehen sich darauf, wie der vollständige Such- und Optimieralgorithmus die Berechnungen durchführt, da diese Abweichung im Graphen besonders auffällig ist.

Grundsätzlich berechnet der vollständige Such- und Optimieralgorithmus die besten Lösungen, außer in den erwähnten Grenzbereichen (104,7 auf 104,6 Volt und 36,5 auf 36,4 Volt). In diesen speziellen Fällen sind die anderen Algorithmen, entweder der VSOA mit Datenfilter oder der Experten-Algorithmus, besser geeignet. Einen besonderen Fall stellt aber die Grenzspannung von 29,6 Volt dar, da hier der Las-Vegas-Algorithmus die beste Lösung berechnet. Dadurch, dass beim LVA aber niemals mit Sicherheit gesagt werden kann, ob er das optimale Ergebnis berechnet, folgt daraus, dass die optimale Lösung bei dieser Grenzspannung noch nicht bekannt ist.

Der **vollständige Such- und Optimieralgorithmus** berechnet in nahezu allen Fällen eine Lösung, welche zu den geringsten Kosten führt. Die Ausnahmen betreffen die oben genannten Bereiche mit den Grenzbereichen (104,7 auf 104,6 Volt und 36,5 auf 36,4 Volt), bei denen mehr hochohmige Erdungsanlagen sinnvoller sind als weniger niederohmige. In diesen Bereichen ist die Charakteristik des Algorithmus zu erkennen, so wenige Erdungsanlagen wie möglich zu verwenden.

Wenn zusätzlich ein Datenfilter verwendet wird, werden fast immer die gleichen Ergebnisse erzielt. Es gibt jedoch Abweichungen bei den anfänglichen maximalen Grenzspannungen, bei denen jeweils einmal eine bessere und eine schlechtere Lösung berechnet werden. Der Vorteil des Datenfilters ist speziell in einer verringerten Laufzeit zu finden, welche gesondert im nächsten Kapitel betrachtet wird.

Der **Las-Vegas-Algorithmus** zeigt, dass auch randombasierende Algorithmen bei einer günstigen, zufälligen Wahl der Zufallszahlen in einen Lösungsbereich nahe dem optimalen Wert kommen können, oder sogar die beste Lösung für eine bestimmte Grenzspannung berechnen können. Wenn der Algorithmus zehnmal ausgeführt wird, liegen die Lösungen meistens zwischen dem vollständigen Such- und Optimieralgorithmus und dem Experten-Algorithmus. Jedoch liegt das Problem darin, dass selbst bei zehnmaliger Ausführung der günstigste Fall einen Ausreißer haben kann, wie z.B. bei 70 Volt. Wenn man den Fall betrachtet, dass schlechte (ungünstige) Zufallszahlen auftreten, dann liegen die Kosten für alle Erdungsanlagen wesentlich höher als bei allen anderen Algorithmen. Daher muss dieser Algorithmus

mehrmals ausgeführt werden, damit die Chance der zufälligen ungünstigen Fälle minimiert wird. Die obere Grenze für die Anzahl an Ausführungen ist dann erreicht, wenn die Laufzeit des vollständigen Such- und Optimieralgorithmus geringer ist als die des Las-Vegas-Algorithmus bei mehrmaliger Ausführung. Der Grund liegt darin, dass der VSOA dann in den meisten Fällen ein besseres Kostenergebnis als der LVA hat.

Der Fokus des **Experten-Algorithmus** liegt auf einer schnellen Laufzeit bei akzeptablen Ergebnissen. Trotzdem sind die Kosten für alle Erdungsanlagen nie höher als das Doppelte der Kosten des Optimums. Die Differenz wird aber tendenziell kleiner je niedriger der maximale Grenzwert ist. Der Grund für die höheren Kosten liegt am Vorgabewert für die Default-Erdungsanlagen, welche in den Programm-Grundeinstellungen immer einen Widerstandswert von 1 Ω haben. Wenn dieser erhöht wird, besteht die Möglichkeit, dass mehr Erdungsanlagen verwendet werden müssen, um unter der Grenzspannung zu bleiben. Sollte das aber nicht der Fall sein, können die Kosten für die Errichtung der Erdungsanlagen reduziert werden. Aufgrund der geringen Laufzeit (siehe 7.1.3) besteht damit für den Benutzer die Möglichkeit, mehrere Berechnungen mit unterschiedlichen Default-Widerstandswerten durchzuführen.

7.1.3. Laufzeitanalyse

Grenzspannung	VSOA	VSOA mit Datenfilter	LVA mit zehn Durchläufen	Experten-Algorithmus
119,0 Volt	0,04 s	0,04 s	0,04 s	0,05 s
118,0 Volt	0,37 s	35,84 s	0,65 s	0,16 s
104,7 Volt	0,36 s	30,04 s	4,22 s	0,16 s
104,6 Volt	75,43 s	30,23 s	5,27 s	0,16 s
100,0 Volt	72,13 s	28,13 s	5,29 s	0,15 s
70,0 Volt	55,58 s	20,49 s	5,85 s	0,16 s
50,0 Volt	54,19 s	19,36 s	10,25 s	0,16 s
36,5 Volt	53,43 s	19,60 s	307,67 s	0,17 s
36,4 Volt	12111,20 s	2490,69 s	499,97 s	0,17 s
35,0 Volt	12127,60 s	2461,01 s	534,12 s	0,17 s
31,0 Volt	12104,20 s	2453,18 s	641,99 s	0,19 s
29,6 Volt	11874,80 s	2392,57 s	51316,95 s	0,19 s
29,0 Volt	2410800,00 s	244900,00 s	106900,00 s	0,20 s

Tabelle 7-12: Laufzeiten der Algorithmen bei Verwendung der Widerstandsreihe bei unterschiedlichen eingegebenen oberen Grenzspannungen³

³ Bei dieser Analyse wird keine Grenzspannung von 10 Volt betrachtet. Diese Optimierung ist bei einem induzierenden Strom von 1000 Ampere nicht möglich.

Tabelle 7-12 zeigt die gesammelten Ergebnisse der Laufzeiten für alle unterschiedlichen Grenzspannungen. Die Grenzspannung von 119 Volt ist ein Vergleichswert, da hier keine Optimierung durchgeführt wird. Aufgrund sehr langer Laufzeiten ist für die Spannung von 29 Volt eine Berechnung nicht mehr mit allen Algorithmen möglich. Die grünen Felder in der Tabelle zeigen Hochrechnungen an, basierend auf den Laufzeiten der vorherigen Berechnungen.

Beim **vollständigen Such- und Optimieralgorithmus** (VSOA) sind im Graphen Laufzeitsprünge zu erkennen. Wie bereits betrachtet, gibt es untere maximale Grenzspannungen, bei denen der Algorithmus mit einer bestimmten Anzahl an Erdungsanlagen die Optimierung durchführen kann. Diese befinden sich bei 104,7 Volt (eine Erdungsanlage), 36,5 Volt (zwei Erdungsanlagen) und 29,6 Volt (drei Erdungsanlagen). Die Höhe der Laufzeitsprünge ist abhängig von der Anzahl der Knotenpunkte, die berücksichtigt werden. So springt die Laufzeit um den Faktor 200 nach oben, wenn kein Datenfilter (= 25 Knotenpunkte) verwendet wird, während bei Verwendung des Datenfilters (= 15 Knotenpunkte) sich die Laufzeit nur um den Faktor 100 erhöht. Der Faktor ist damit zwar abhängig von der Anzahl der Knotenpunkte, steigt aber nicht linear an. Der Grund liegt darin, dass bei wenigen Knotenpunkten wesentlich mehr doppelte Erdungsanlagenkombinationen herausgefiltert werden als bei einer großen Anzahl an Knotenpunkten.

Der VSOA ist mit einer Erdungsanlage quasi gleich schnell wie der Experten-Algorithmus, aber bereits bei zwei Erdungsanlagen wächst der Laufzeitunterschied stark an und beträgt bereits ca. das 400-fache. Bei drei Erdungsanlagen braucht der VSOA bereits mehr als 3 Stunden, um zu einem (meist) optimalen Ergebnis zu kommen. Bei der maximalen Grenzspannung von 29 Volt ist nur mehr eine Hochrechnung verfügbar, da hier die Laufzeit ca. 27 Tage dauert. Somit ist klar, dass dieser Algorithmus bei mehr als drei Erdungsanlagen nicht mehr vernünftig einsetzbar ist. Da der VSOA ein „hartes Problem“ berechnet, hat er eine exponentiell steigende Laufzeit und gilt ab vier Erdungsanlagen aufgrund der Laufzeit als nicht durchführbar (siehe Kapitel 4.3.6). Damit ist diese Theorie über ein praktisches Beispiel bewiesen.

Wird jedoch der Datenfilter verwendet, reduziert sich die Laufzeit beträchtlich. Der Faktor der Reduzierung nimmt mit steigender Erdungsanlagenanzahl zu, sodass bei drei Erdungsanlagen die Laufzeit um den Faktor 5 gegenüber VSOA ohne Datenfilter kürzer ist. Wenn vier Erdungsanlagen verwendet werden müssen (Grenzspannung beträgt dann 29 Volt), liegt die Laufzeitverkürzung bei einem Faktor von ca. 10, weswegen die Berechnung ca. 3 Tage beträgt. Aufgrund der vorhanden exponentiellen Notation gilt auch hier, dass der Algorithmus ab diesem Punkt undurchführbar ist.

Bei beiden Algorithmen ist aber auch eine Laufzeitreduzierung bei zwei Erdungsanlagen ersichtlich, die prozentuell ähnlich groß ist. Durch die sinkende maximale Grenzspannung wird die Anzahl der Erdungsanlagenkombinationen, welche unter der Maximalspannung liegen, reduziert und dadurch können die nachfolgenden Berechnungen zum Finden der optimalen Kombinationen schneller durchgeführt werden (im Kapitel 6.1.3 ab dem Block (6)).

Der **Las-Vegas-Algorithmus** (LVA) wird bei jeder maximalen Grenzspannung zehnmal ausgeführt. Überraschenderweise sind die durchschnittlichen Laufzeiten im Vergleich zum vollständigen Such- und Optimieralgorithmus schneller. Trotzdem ist der Algorithmus wesentlich langsamer als der Experten-Algorithmus. Dadurch ist es möglich, relativ gute Lösungen bei geringerer Laufzeit als beim VSOA zu bekommen. Wie bereits mit vorherigen Analysen gezeigt wurde, sind zehn Durchläufe bei ungünstigen Zufallszahlen zu wenig. Wenn daher der LVA öfters ausgeführt wird, um ein besseres Ergebnis zu bekommen, ist darauf zu achten, dass die Laufzeit nicht länger wird als die des vollständigen Such- und Optimieralgorithmus, da dieser in nahezu allen Fällen das bessere Ergebnis liefert.

In Abbildung 7-3 ist ersichtlich, dass der Algorithmus eine streng monoton ansteigende Laufzeit hat. Dies hat mehrere Gründe. Einer ist, dass bei sinkender maximaler Grenzspannung mehr Erdungsanlagen verwendet werden, die aufwendiger und damit länger berechnet werden müssen. Ebenfalls eine Folge der sinkenden Grenzspannung ist die Reduzierung der möglichen Erdungsanlagenkombinationen, um das Ziel zu erreichen. Da der Algorithmus aufgrund seiner Charakteristik die erste Kombination wählt, bei der der berechnete Spannungsverlauf unter der maximalen Grenzspannung liegt, dauert es unter Umständen länger, eine passende Erdungsanlagenkombination zu finden. Schlussendlich bleibt es dem Glück überlassen, wie lange die Laufzeit ist, da es durch den Zufall bedingt eine sehr große Abweichung von der durchschnittlichen Laufzeit gibt. Nach der aktuellen Berechnungsmethode gibt es auch hier einen Punkt, ab dem der Algorithmus undurchführbar ist. Bereits bei einer Grenzspannung von 29 Volt beträgt die Berechnungsdauer nach einer Hochrechnung ca. 30 Stunden. Jedoch ohne Garantie darauf, dass das Ergebnis optimal ist.

Wenn die Laufzeiten betrachtet werden, ist deutlich zu erkennen, dass der **Experten-Algorithmus** eine quasi-konstante Laufzeit über alle Optimierbedingungen hat. Auch bei gesteigerten Anforderungen (29 Volt) vergrößert sich die Laufzeit gegenüber einer einfachen Optimierung (118 Volt) um nur 25 %. Diese quasi-konstanten Laufzeiten werden als eine nahezu gerade Trendlinie in Abbildung 7-3 dargestellt. Selbst bei einer logarithmischen Darstellung der Laufzeit ist der Abstand zu den anderen Algorithmen bereits bei niedrigen Grenzspannungen von unter 100 Volt deutlich zu sehen. Daher ist der Experten-Algorithmus, wenn nur die Laufzeit betrachtet wird, bei der Berechnung von Lösungen sehr effizient und schnell für alle genannten Probleme.

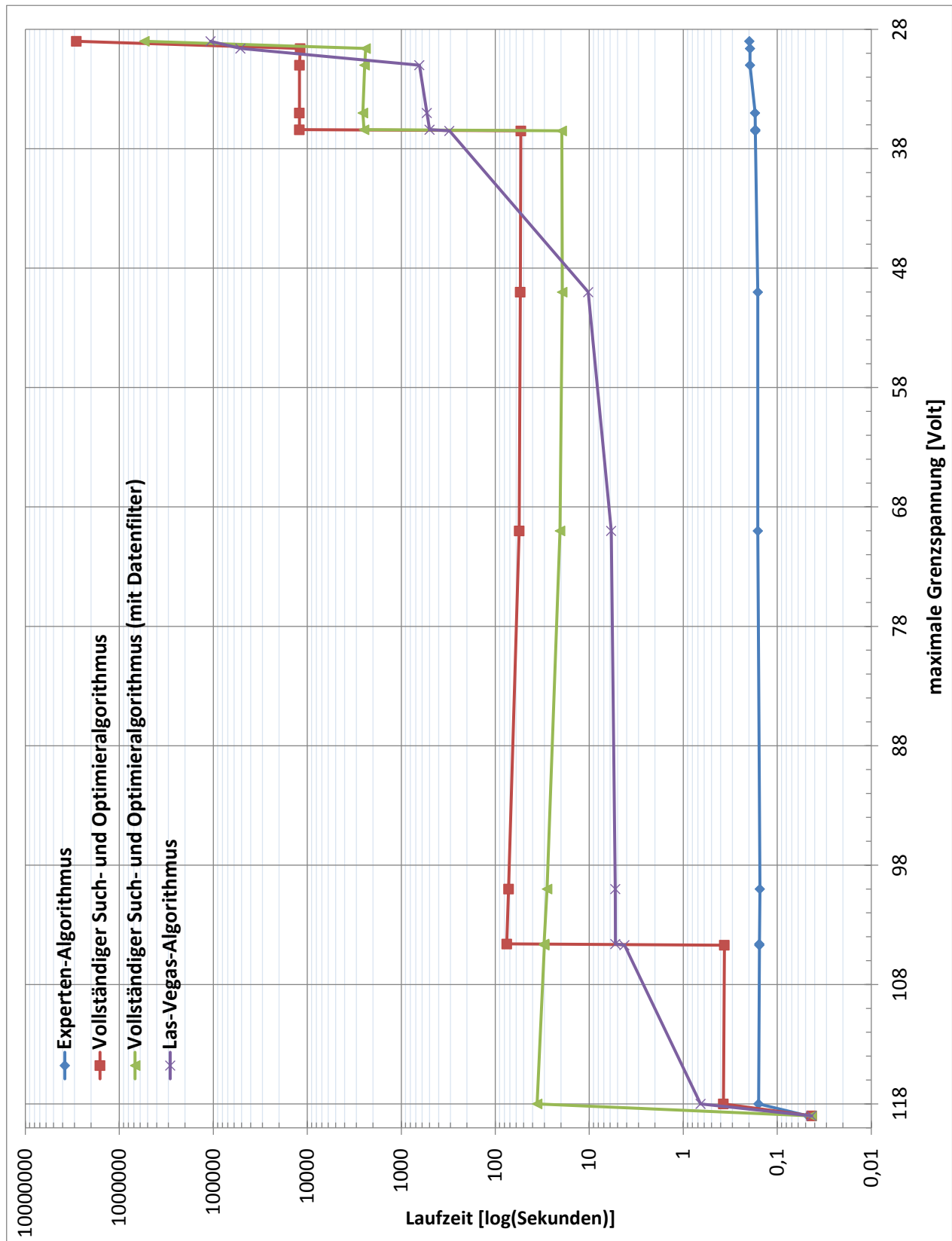


Abbildung 7-3: Laufzeiten der Algorithmen bei Verwendung der Widerstandsreihe bei unterschiedlichen eingegebenen oberen Grenzspannungen

7.2. Verwendung des fixen Widerstandswertes von 1 Ω

Eine Erdungsanlage mit einem Widerstandswert von 1 Ω kostet 20000 GE. Daher stehen die Kosten in direktem Zusammenhang mit der Anzahl an verwendeten Erdungsanlagen, die ein Algorithmus benötigt, um das Optimierungsproblem zu berechnen.

7.2.1. Analyse der berechneten Lösungen für das Beispiel

- **Vorgegebene obere Grenzspannung: 118 Volt**

Grenzspannung: 118 Volt Spannungsverlauf: Abbildung B-1 auf Seite 114	Trassenkilometer	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
VSOA	4,3 km	20000 GE
VSOA mit Datenfilter	0 km ; 7 km	40000 GE
LVA (bestes Ergebnis)	3,7 km	20000 GE
LVA (schlechtestes Ergebnis)	2,6 km ; 4,8 km	40000 GE
Experten-Algorithmus	0 km ; 7 km	40000 GE

Tabelle 7-13: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 118 Volt

Das Optimum liegt bei der Verwendung einer Erdungsanlage mit den Kosten von 20000 GE. Dieses Ziel erreicht der VSOA und der LVA (bestes Ergebnis) auf unterschiedlichen Trassenkilometern. Die anderen Algorithmen brauchen zwei Erdungsanlagen, die sich teilweise auf anderen Positionen befinden. Während der Experten-Algorithmus und der VSOA (mit Datenfilter) aufgrund ihrer Charakteristik diese Lösung berechnen, ist das schlechteste Ergebnis des LVA dadurch ausgelöst, dass die maximale Anzahl an Versuchen für eine Erdungsanlage überschritten wird.

Die Anzahl der Erdungsanlagen bleibt bei den jeweiligen Algorithmen bis zur Grenzspannung von 105 Volt gleich.

- **Vorgegebene obere Grenzspannung: 100 Volt, 70 Volt, 52 Volt**

Grenzspannung: 100 Volt Spannungsverlauf: Abbildung B-2 auf Seite 115	Trassenkilometer	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
VSOA	0 km ; 7 km	40000 GE
VSOA mit Datenfilter	0 km ; 7 km	40000 GE
LVA (bestes Ergebnis)	0,3 km ; 5,8 km	40000 GE
LVA (schlechtestes Ergebnis)	0,9 km ; 5,2 km	40000 GE
Experten-Algorithmus	0 km ; 7 km	40000 GE

Tabelle 7-14: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 100 Volt

Grenzspannung: 70 Volt Spannungsverlauf: Abbildung B-3 auf Seite 115	Trassenkilometer	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
VSOA	0 km ; 7 km	40000 GE
VSOA mit Datenfilter	0 km ; 7 km	40000 GE
LVA (bestes Ergebnis)	0 km ; 6,7 km	40000 GE
LVA (schlechtestes Ergebnis)	0,9 km ; 6,1 km	40000 GE
Experten-Algorithmus	0 km ; 7 km	40000 GE

Tabelle 7-15: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 70 Volt

Grenzspannung: 52 Volt Spannungsverlauf: Abbildung B-4 auf Seite 116	Trassenkilometer	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
VSOA	0,6 km ; 7 km	40000 GE
VSOA mit Datenfilter	0,6 km ; 7 km	40000 GE
LVA (bestes Ergebnis)	0,6 km ; 7 km	40000 GE
LVA (schlechtestes Ergebnis)	0 km ; 2,6 km ; 7 km	60000 GE
Experten-Algorithmus	0 km ; 1,6 km ; 6,3 km ; 7 km	80000 GE

Tabelle 7-16: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 52 Volt

Bei allen Grenzspannungen sind zwei Erdungsanlagen das Optimum. Bei 100 und 70 Volt wird dieses Optimum von allen Algorithmen erreicht, jedoch unterscheiden sie sich zum Teil in ihrer Position an der Rohrleitung. 52 Volt stellen die untere Grenzspannung für zwei Erdungsanlagen dar. Durch seine Optimiercharakteristik verwendet hier der Experten-Algorithmus bereits vier Erdungsanlagen, wodurch die Kosten auf das Doppelte steigen. Beim Las-Vegas-Algorithmus wird die Anzahl an Versuchen mit zwei Erdungsanlagen mehrmals überschritten, dadurch werden im besten Fall zwei, im schlechtesten Fall drei Erdungsanlagen berechnet.

- **Vorgegebene obere Grenzspannung: 50 Volt**

Grenzspannung: 50 Volt Spannungsverlauf: Abbildung B-5 auf Seite 116	Trassenkilometer	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
VSOA	0 km ; 0,3 km ; 7 km	60000 GE
VSOA mit Datenfilter	0 km ; 0,3 km ; 7 km	60000 GE
LVA (bestes Ergebnis)	0 km ; 0,3 km ; 7 km	60000 GE
LVA (schlechtestes Ergebnis)	0 km ; 2,6 km ; 5,1 km ; 6,7 km	80000 GE
Experten-Algorithmus	0 km ; 1,6 km ; 6,3 km ; 7 km	80000 GE

Tabelle 7-17: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 50 Volt

Im Bereich von 49 bis 51 Volt sind drei Erdungsanlagen das Optimum, die Tabelle 7-17 stellt die Grenzspannung von 50 Volt dar. Der VSOA berechnet in allen Fällen dieses Optimum. Der LVA berechnet für den besten Fall wiederum das optimale Ergebnis, benötigt aber im schlechtesten Fall vier Erdungsanlagen. Damit besitzt diese Grenzspannung die gleiche Charakteristik wie die Spannung von 52 Volt. Der Experten-Algorithmus verwendet die vorherige Konfiguration weiter, ist aber dadurch um 33% teurer. Der Unterschied ist damit nicht mehr so groß wie bei der vorherigen Grenzspannung.

- **Vorgegebene obere Grenzspannung: 48 Volt, 40 Volt, 35 Volt**

Grenzspannung: 48 Volt Spannungsverlauf: Abbildung B-6 auf Seite 117	Trassenkilometer	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
VSOA	0 km ; 0,3 km ; 6,7 km ; 7 km	80000 GE
VSOA mit Datenfilter	0 km ; 0,3 km ; 6,7 km ; 7 km	80000 GE
LVA (bestes Ergebnis)	0,6 km ; 0,9 km ; 5,1 km ; 7 km	80000 GE
LVA (schlechtestes Ergebnis)	0 km ; 2,5 km ; 6,1 km ; 6,7 km	80000 GE
Experten-Algorithmus	0 km ; 1,6 km ; 6,3 km ; 7 km	80000 GE

Tabelle 7-18: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 48 Volt

Grenzspannung: 40 Volt Spannungsverlauf: Abbildung B-7 auf Seite 117	Trassenkilometer	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
VSOA	0 km ; 0,9 km ; 6, km 7 ; 7 km	80000 GE
VSOA mit Datenfilter	0 km ; 0,9 km ; 6,7 km ; 7 km	80000 GE
LVA (bestes Ergebnis)	0,6 km ; 1,6 km ; 6,3 km ; 7 km	80000 GE
LVA (schlechtestes Ergebnis)	0,9 km ; 1,9 km ; 5,8 km ; 7 km	80000 GE
Experten-Algorithmus	0 km ; 1,6 km ; 6,3 km ; 7 km	80000 GE

Tabelle 7-19: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 40 Volt

Grenzspannung: 35 Volt Spannungsverlauf: Abbildung B-8 auf Seite 118	Trassenkilometer	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
VSOA	0 km ; 1,3 km ; 6,7 km ; 7 km	80000 GE
VSOA mit Datenfilter	0 km ; 1,3 km ; 6,7 km ; 7 km	80000 GE
LVA (bestes Ergebnis)	0,3 km ; 1,3 km ; 6,3 km ; 7 km	80000 GE
LVA (schlechtestes Ergebnis)	0,3 km ; 1,6 km ; 6, km 7 ; 7 km	80000 GE
Experten-Algorithmus	0 km ; 1,6 km ; 6,3 km ; 7 km	80000 GE

Tabelle 7-20: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 35 Volt

Für die Berechnung dieser drei Grenzspannungen sind vier Erdungsanlagen notwendig. Alle Algorithmen berechnen dabei eine Lösung, die genau dieses optimale Ergebnis widerspiegelt. Durch ihre unterschiedlichen Optimiercharakteristiken variieren die Positionen der Erdungsanlagen und dadurch sind alle Spannungsverläufe unterschiedlich. Damit wird auch gezeigt, dass es mehrere, gleich gute Lösungen mit einem Widerstandswert gibt, welche unter diese Grenzspannungen optimiert werden können.

- **Vorgegebene obere Grenzspannung: 32 Volt**

Grenzspannung: 32 Volt Spannungsverlauf: Abbildung B-9 auf Seite 118	Trassenkilometer	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen
VSOA	0,3 km ; 1,6 km ; 6,7 km ; 7 km	80000 GE
VSOA mit Datenfilter	0,3 km ; 1,6 km ; 6,7 km ; km 7	80000 GE
LVA (bestes Ergebnis)	0,3 km ; 1,6 km ; 6,7 km ; 7 km	80000 GE
LVA (schlechtestes Ergebnis)	0,3 km ; 1,6 km ; 6,7 km ; 7 km	80000 GE
Experten-Algorithmus	0 km ; 1,3 km ; 1,6 km ; 6,3 km ; 6,7 km ; 7 km	120000 GE

Tabelle 7-21: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 32 Volt

Tabelle 7-21 zeigt Lösungen für die Grenzspannung von 32 Volt. Diese Spannung ist das untere Limit, um vier Erdungsanlagen verwenden zu können. Sowohl VSOA als auch alle Fälle des LVA haben genau dieses ideale Ergebnis, denn nur eine mögliche Erdungsanlagenkombination mit vier Anlagen kann unter diese maximale Grenzspannung optimieren. Der Experten-Algorithmus liefert in diesem Grenzbereich eine andere Lösung. Er benötigt sechs Erdungsanlagen, daher ist seine Lösung um 50 % teurer. Mit dieser berechneten Lösung können aber weitere Grenzspannungen optimiert werden, welche noch niedriger liegen, die untere Grenzspannung liegt dann bei 25,5 Volt. Die anderen Algorithmen müssen dazu neue Lösungen berechnen, haben dabei aber eine wesentlich längere Laufzeit.

7.2.2. Kostenanalyse der Lösung bei der jeweiligen Grenzspannung

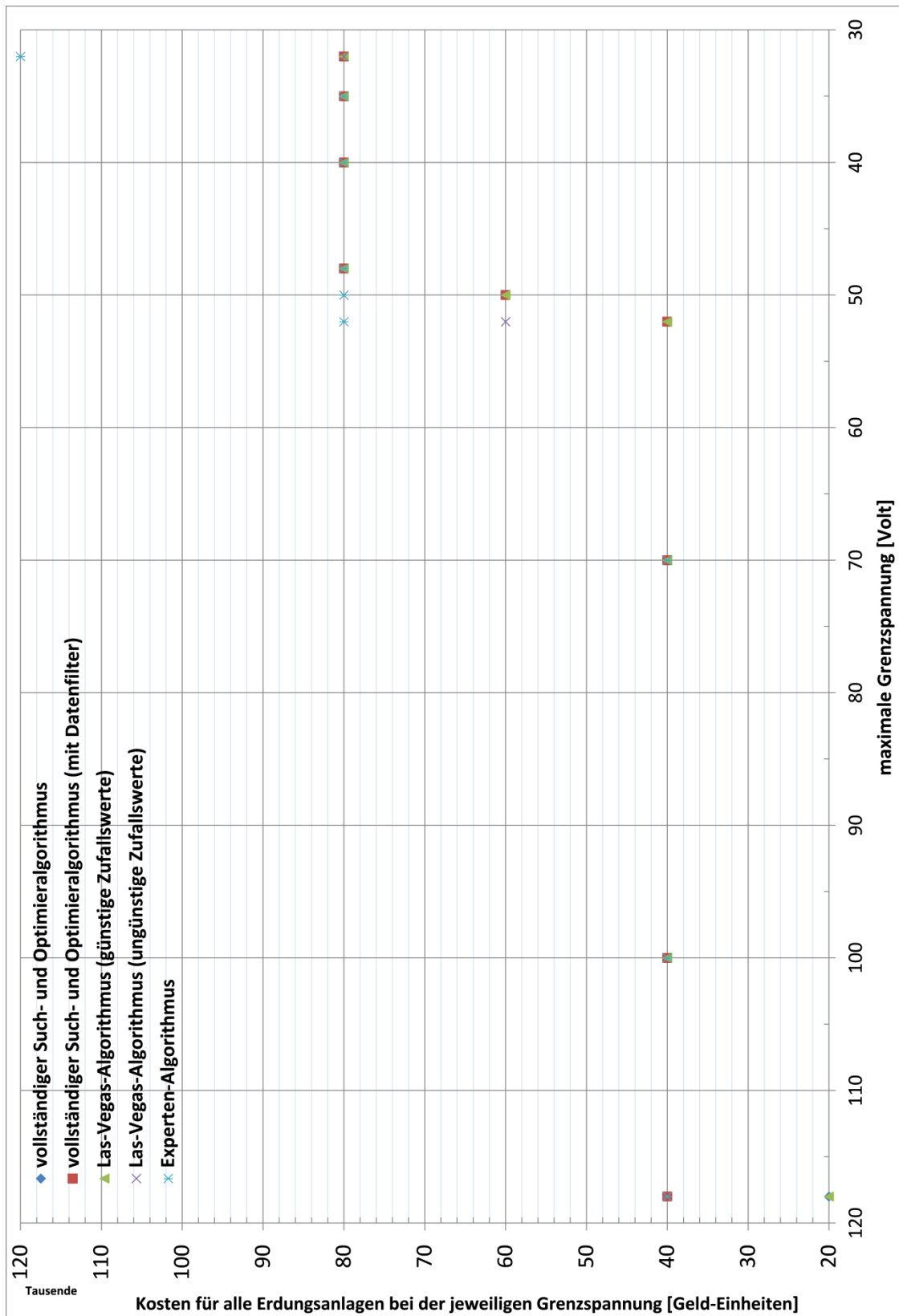


Abbildung 7-4: Kostenanalyse der berechneten Lösungen der Algorithmen bei Verwendung des fixen Widerstandswertes von 1 Ω

Die Kosten für die Errichtung der Erdungsanlagen bei einem fixen Widerstandswert von 1Ω für die unterschiedlichen Algorithmen wird in Abbildung 7-4 dargestellt. Die Algorithmen berechnen trotz ihrer unterschiedlichen Optimiercharakteristiken ähnliche Lösungen, bei vielen Grenzspannungen sogar das gleiche Kostenergebnis. Auch hier zeigt sich, dass bei bestimmten eingegebenen maximalen Grenzspannungen die Algorithmen unterschiedliche Kostenergebnisse produzieren. Diese finden sich in Bereichen, in denen sich die Anzahl der Erdungsanlagen ändert. Im betrachteten Spannungsbereich liegen diese bei 118 Volt (eine oder zwei Erdungsanlagen) und dem nahezu sprunghaften Wechsel von zwei auf vier Erdungsanlagen zwischen 52 und 48 Volt.

Der **vollständige Such- und Optimieralgorithmus** berechnet in allen Fällen die beste Kostenoptimierung. Der Datenfilter verfälscht das Ergebnis nur im Startbereich von 118 Volt (zwei Erdungsanlagen, doppelte Kosten), ansonsten werden immer die identen Ergebnisse berechnet.

Der **Las-Vegas-Algorithmus** ist mit seinem besten Ergebnis aus zehn Durchläufen immer gleichauf mit dem VSOA.

Auch wenn ungünstige Zufallszahlen getroffen werden, sind die Lösungen in nahezu allen Fällen identisch mit dem jeweilig besten Ergebnis. Bei den maximalen Grenzspannungen von 118, 52 und 50 Volt werden teurere Ergebnisse erzielt, da mehr Erdungsanlagen verwendet werden. Der Grund liegt darin, dass die maximale Anzahl an Versuchen mit einer bestimmten Anzahl an Erdungsanlagen überschritten und daher eine zusätzliche Erdungsanlage verwendet wird.

Ein differenziertes Bild liefert der **Experten-Algorithmus**. In einigen Bereichen berechnet er ebenfalls das optimale Ergebnis, bei anderen Spannungen entstehen doppelt so hohe Kosten, da die doppelte Anzahl an Erdungsanlagen verwendet wird. Diese Fälle treten besonders in Bereichen auf, in denen sich die Anzahl an Erdungsanlagen infolge von niedrigeren maximalen Grenzspannungen erhöht.

7.2.3. Laufzeitanalyse

Grenzspannung	VSOA	VSOA mit Datenfilter	LVA mit zehn Durchläufen	Experten-Algorithmus
118 Volt	0,07	0,40	1,03	0,05
100 Volt	0,89	0,38	1,24	0,05
70 Volt	0,80	0,33	1,23	0,05
52 Volt	0,79	0,30	9,70	0,05
50 Volt	14,05	3,05	55,72	0,05
48 Volt	336,74	48,33	135,14	0,05
40 Volt	302,39	38,56	152,38	0,05
35 Volt	299,83	37,32	457,28	0,05
32 Volt	303,88	38,97	2194,28	0,05
31 Volt	172800,00	11863,90	64800,00	0,05

Tabelle 7-22: Laufzeiten der Algorithmen bei Verwendung des fixen Widerstandswertes von 1 Ω bei unterschiedlichen eingegebenen oberen Grenzspannungen⁴

Tabelle 7-22 zeigt die gesammelten Ergebnisse der Laufzeiten für alle unterschiedlichen Grenzspannungen. Diese starten bei 118 Volt, welches die einfachste Optimierung darstellt. Der Bereich der maximalen Grenzspannung endet bei 31 Volt, aber aufgrund langer Laufzeiten ist eine Berechnung dieser Spannung nicht mit allen Algorithmen möglich. Die grünen Felder zeigen Hochrechnungen von Laufzeiten an.

Der **vollständige Such- und Optimieralgorithmus** ist bei Verwendung einer Erdungsanlage in etwa gleich schnell wie der Experten-Algorithmus. Wenn mehr Erdungsanlagen bei einer Grenzspannung als bei der vorherigen verwendet werden müssen, steigt die Laufzeit an diesen Punkten immer sprunghaft an, da wesentlich mehr Kombinationsmöglichkeiten berechnet werden müssen. Diese Sprünge befinden sich bei 100, 50, 48 und 31 Volt. Der Laufzeitunterschied hat z.B. zwischen drei und vier verwendeten Erdungsanlagen (von 50 auf 48 Volt) einen Faktor von ca. 20.

Bei der Grenzspannung von 31 Volt kann nur eine Hochrechnung durchgeführt werden. Selbst diese Laufzeit ist nur vage vorhersagbar, da nicht genau bekannt ist wie viele Erdungsanlagen tatsächlich benötigt werden. Die Hochrechnung basiert auf der Verwendung von sechs Erdungsanlagen, diese Anzahl konnte mithilfe des Datenfilters errechnet werden.

⁴ Bei dieser Analyse wird keine Grenzspannung von 10 Volt betrachtet. Diese Optimierung ist bei einem induzierenden Strom von 1000 Ampere nicht möglich.

Der Unterschied zwischen gefilterter und ungefilterter Berechnung wird mit jeder zusätzlichen Erdungsanlage größer. Die Laufzeiten mit Datenfilter sind z.B. bei vier Erdungsanlagen um das 8-fache kürzer. Daher ist die Verwendung des Datenfilters bei einem fixen Widerstandswert sinnvoll, da bereits im vorherigen Kapitel gezeigt wird, dass die Ergebnisse fast immer gleich sind. Bei der Grenzspannung von 31 Volt ist der Unterschied sehr deutlich zu sehen, somit kann bei Verwendung des Datenfilters eine Optimierung in einer relativ kurzen Zeit errechnet werden.

Der **Las-Vegas-Algorithmus** kann bei der Verwendung eines fixen Widerstandswertes nicht überzeugen, wenn nur die Laufzeit betrachtet wird. Diese ist bei zehnmaliger Ausführung bei nahezu allen Grenzspannungen diejenige mit dem höchsten Wert. In Abbildung 7-5 ist ersichtlich, dass der Algorithmus eine streng monoton ansteigende Laufzeit hat. Dies hat mehrere Gründe. Einer ist, dass bei sinkender maximaler Grenzspannung mehr Erdungsanlagen verwendet werden, die aufwendiger und damit länger berechnet werden müssen. Ebenfalls eine Folge der sinkenden Grenzspannung ist die Reduzierung der möglichen Erdungsanlagenkombinationen, um das Ziel zu erreichen. Da der Algorithmus aufgrund seiner Charakteristik die erste Kombination wählt, bei der der berechnete Spannungsverlauf unter der maximalen Grenzspannung liegt, dauert es unter Umständen länger, eine passende Erdungsanlagenkombination zu finden. Schlussendlich bleibt es dem Zufall überlassen, wie lange die Laufzeit ist, da es durch die zufällig gewählten Parameter bedingt eine sehr große Abweichung von der durchschnittlichen Laufzeit gibt. Nach der aktuellen Berechnungsmethode gibt es auch hier einen Punkt, ab dem der Algorithmus undurchführbar ist.

Bei der maximalen Grenzspannung von 32 Volt ist die Laufzeit siebenfach größer als beim vollständigen Such- und Optimieralgorithmus. Sind die Zufallszahlen ungünstig, besteht auch die Möglichkeit, dass das Ergebnis relativ weit vom Optimum entfernt ist. Wenn die Grenzspannung von 31 Volt eingegeben wird, muss auch dieser Algorithmus sechs Erdungsanlagen verwenden. Jedoch wird dann die Laufzeit so groß, dass eine Berechnung sehr zeitintensiv ist, weil diese umgerechnet 18 Stunden dauert und es keine Garantie gibt, dass das Ergebnis optimal ist.

Der **Experten-Algorithmus** hat, über mehrere Versuche gemittelt, eine konstante Laufzeit, die auch bei erschwerten Bedingungen eingehalten wird. So kann im Gegensatz zu den anderen Algorithmen auch bei einer Grenzspannung von 31 Volt eine sehr schnelle Optimierung durchgeführt werden. Dadurch ist dieser mit Abstand der schnellste Algorithmus, in Abbildung 7-5 wird dies durch eine gerade Trendlinie dargestellt.

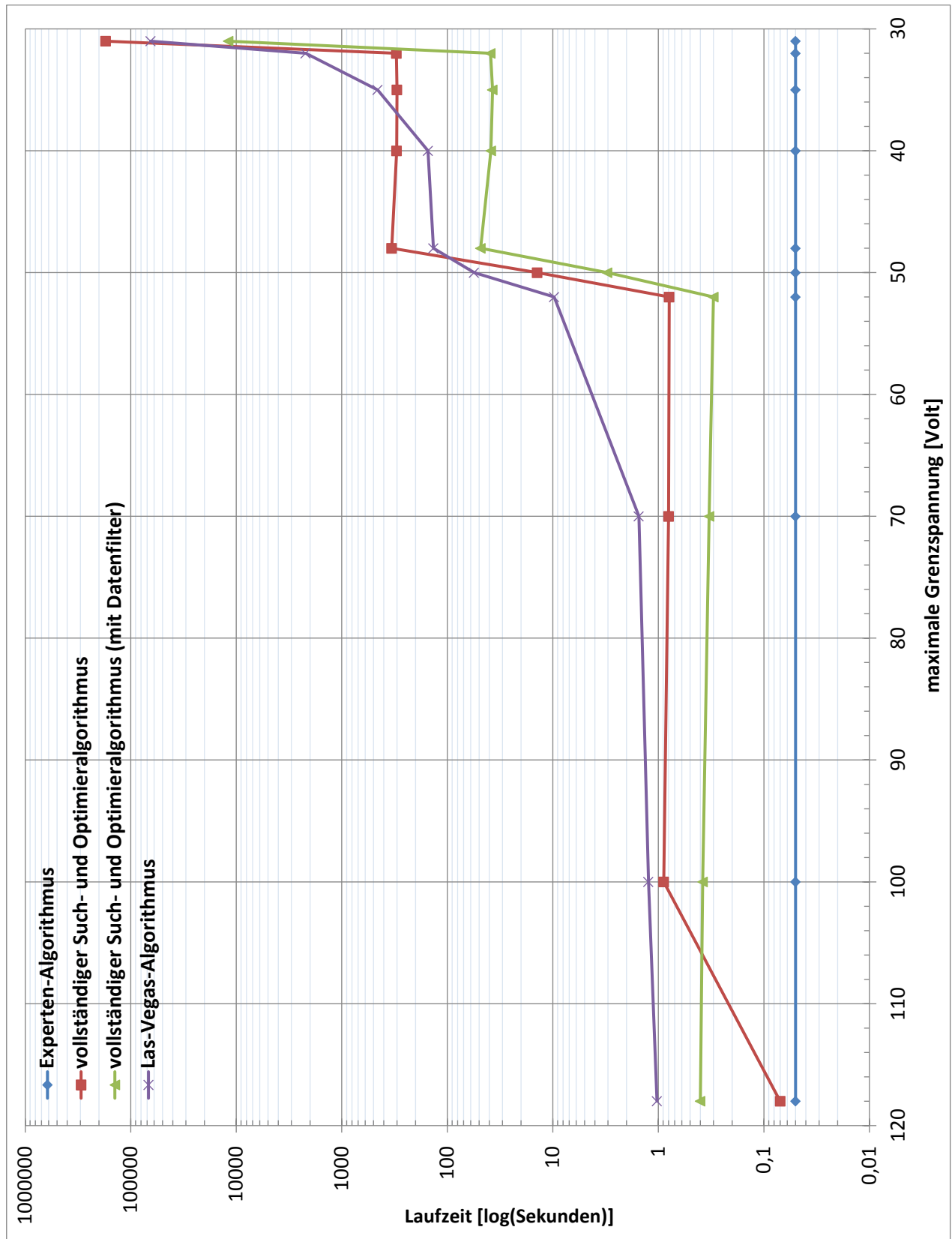


Abbildung 7-5: Laufzeitanalyse der Algorithmen bei Verwendung des fixen Widerstandswertes

7.3. Vergleich der zwei Widerstands-Berechnungsmethoden

In diesem Vergleich wird untersucht, wie sich die Verwendung von einem fixen Widerstandwertes von 1Ω auf Laufzeit und optimale Lösung auswirkt. Dazu werden bestimmte eingegebene maximale Grenzspannungen untersucht, die bei beiden Methoden verwendet werden. Die Referenzwerte finden sich in den vorherigen Kapiteln bei den jeweiligen Grenzspannungen.

Spannung	VSOA ohne Filter		VSOA mit Filter		LVA (beste Lösung)		Experten-Alg.	
	Laufzeit	Kosten	Laufzeit	Kosten	Laufzeit	Kosten	Laufzeit	Kosten
118 Volt	529 %	25 %	8960 %	25 %	63 %	25 %	0 %	63 %
100 Volt	8104 %	25 %	7402 %	25 %	427 %	33 %	300 %	68 %
70 Volt	6946 %	45 %	6209 %	45 %	476 %	93 %	320 %	88 %
50 Volt	386 %	70 %	635 %	70 %	18 %	74 %	320 %	61 %
35 Volt	4044 %	94 %	6507 %	94 %	117 %	109 %	340 %	94 %
31 Volt	7 %	69 %	21 %	69 %	1 %	70 %	380 %	88 %

Tabelle 7-23: Vergleich der zwei Widerstands-Berechnungsmethoden

Als Referenz für Laufzeit und Kosten wird der fixe Widerstandswert von 1Ω (entspricht einem Vergleichswert von 100 %) verwendet. Die Tabelle 7-23 liest sich dadurch folgend:

Der vollständige Such- und Optimieralgorithmus (VSOA) ohne Datenfilter berechnet bei Verwendung der Widerstandsreihe eine Lösung für die maximale Grenzspannung von 118 Volt, welche 25 % der Lösung kostet, bei der ein fixer Widerstandswert von 1Ω verwendet wird. Der Algorithmus hat dadurch eine um 429 % längere Laufzeit, benötigt also ca. die fünffache Zeit.

Die Tabelle zeigt, dass die Algorithmen, wenn sie die Widerstandsreihe verwenden, fast immer Lösungen berechnen, die zum Teil deutlich günstiger sind. Einzige Ausnahme bildet hier der LVA, der bei ungünstigen Zufallszahlen auch bei zehnmaliger Ausführung teurere Ergebnisse liefern kann. Der Nachteil der günstigeren Lösungen liegt in der zum Teil massiv längeren Laufzeit (bis zu 90-fach). Die einzigen Ausnahmen bilden Grenzspannungen, bei denen weniger Erdungsanlagen benötigt werden als bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes. Dieser Effekt tritt besonders bei 31 Volt auf, hier ist die Widerstandsreihe sowohl vom Ergebnis als auch von der Laufzeit her schneller.

Werden die absoluten Laufzeiten betrachtet, dann ist der Nachteil bei höheren Grenzspannungen geringer, da hier weniger Erdungsanlagen verwendet werden und dadurch die Laufzeit gering ist. Dieser Effekt wird in den folgenden Beispielen mit praxis-orientierten Grenzspannungen noch untermauert.

7.4. Analyse für die Richtlinien TE30 und CEN/TS 15280

Mit der Widerstandsreihe			
Grenzspannung: 65 Volt (TE 30) Spannungsverlauf: Abbildung 7-6	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen	Laufzeit in [s]
VSOA	1,7 Ω (0 km) ; 1,7 Ω (7 km)	23529 GE	54,92
VSOA (mit Datenfilter)	1,7 Ω (0 km) ; 1,7 Ω (7 km)	23529 GE	20,36
LVA (bestes Ergebnis)	1 Ω (0,6 km) ; 1,3 Ω (6,7 km)	35385 GE	6,44
Experten-Algorithmus	1,3 Ω (0 km) ; 1 Ω (7 km)	35385 GE	0,16
Mit dem fixen Widerstandswert von 1 Ω			
Grenzspannung: 65 Volt (TE 30) Spannungsverlauf: Abbildung 7-7	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen	Laufzeit in [s]
VSOA	1 Ω (0 km) ; 1 Ω (7 km)	40000 GE	0,83
VSOA (mit Datenfilter)	1 Ω (0 km) ; 1 Ω (7 km)	40000 GE	0,45
LVA (bestes Ergebnis)	1 Ω (0,6 km) ; 1 Ω (6,3 km)	40000 GE	2,05
Experten-Algorithmus	1 Ω (0 km) ; 1 Ω (7 km)	40000 GE	0,05

Tabelle 7-24: Analyse der Daten bei einer oberen Grenzspannung von 65 Volt (TE30) bei einem induzierten Strom von 1000 Ampere

Um den Spannungsverlauf von Abbildung 7-1 auf eine Spannung von 65 Volt (TE30) zu optimieren, sind nur zwei Erdungsanlagen notwendig. Damit ist dieses Problem relativ einfach zu berechnen. Anhand der Tabelle 7-24 ist klar ersichtlich, dass der vollständige Such- und Optimieralgorithmus (VSOA), sowohl mit, als auch ohne Datenfilter, das beste Ergebnis berechnet (siehe Abbildung 7-6). Da das Problem einfach zu berechnen ist, ist die Laufzeit des Algorithmus mit 20 bzw. 55 Sekunden relativ kurz, daher ist dieser Algorithmus für dieses Problem die beste Wahl. Der Las-Vegas-Algorithmus (LVA) und der Experten-Algorithmus weisen die gleichen Gesamtkosten auf, welche jedoch um 50 % höher im Vergleich zur Optimallösung sind. Der Nachteil des VSOA, die höhere Laufzeit, ist also in diesem Fall vernachlässigbar.

Die Berechnungen mit dem fixen Widerstandswert zeigen, dass diese zwar sehr schnell durchführbar sind, aber auch die höchsten Kosten verursachen. Bei Betrachtung von Abbildung 7-7 zeigt sich, dass mit diesen Erdungsanlagen bis zu einer Spannung von 60 Volt optimiert werden kann. Der Abstand von 5 Volt kann wiederum genützt werden, um Schwankungen des Erdwiderstandes zu berücksichtigen.

Es haben also beide Lösungen ihre Vorteile. Während die genaue Lösung die geringsten Kosten aufweist, hat die andere Lösung eine Spannungstoleranz für unvorhergesehene Ereignisse. Jedoch kann mit der Widerstandsreihe auch auf eine Spannung von 60 Volt optimiert werden, daher ist die Widerstandsreihe aufgrund höherer Flexibilität die bessere Lösung.

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Spannungsverläufe für die unterschiedlichen Algorithmen. Die Erdungsanlagen sind als hellblaue, senkrechte Linien eingezeichnet und deren oberen Ende befindet sich ein hellblauer Punkt, welcher direkt auf der anderen Linie eingezeichnet ist. An diesem Trassenkilometer befindet sich die Erdungsanlage für den jeweiligen Algorithmus. Befinden sich jedoch Erdungsanlagen für unterschiedliche Algorithmen am gleichen Trassenkilometer, sind die hellblauen Linien überlagert.

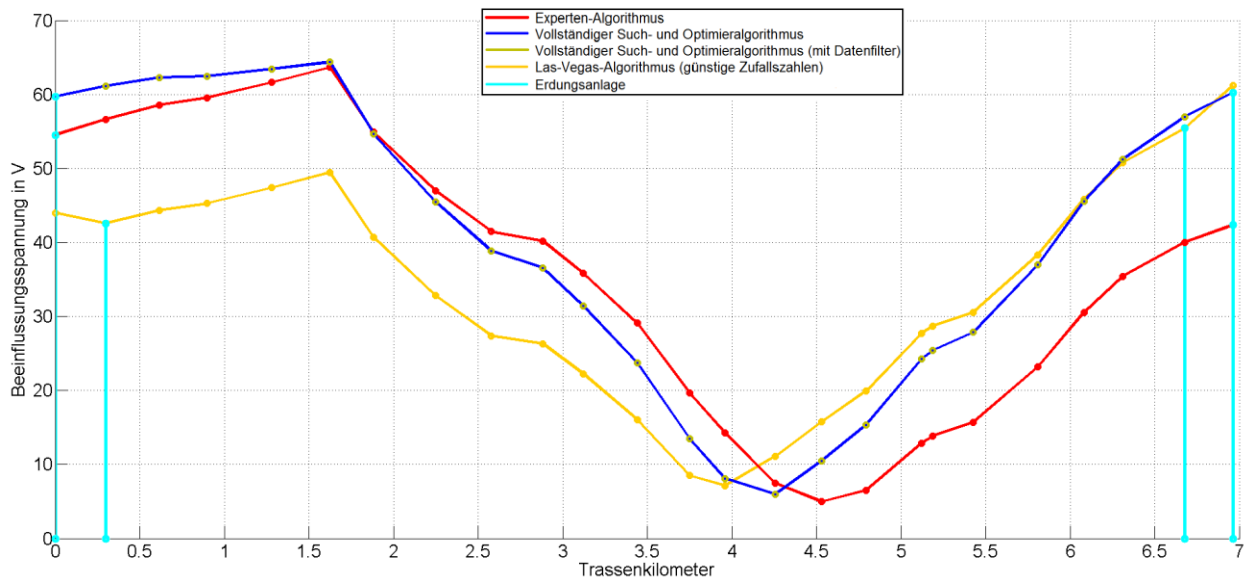


Abbildung 7-6: Beurteilung der Spannungsverläufe gemäß TE30 bei Verwendung der Widerstandsreihe

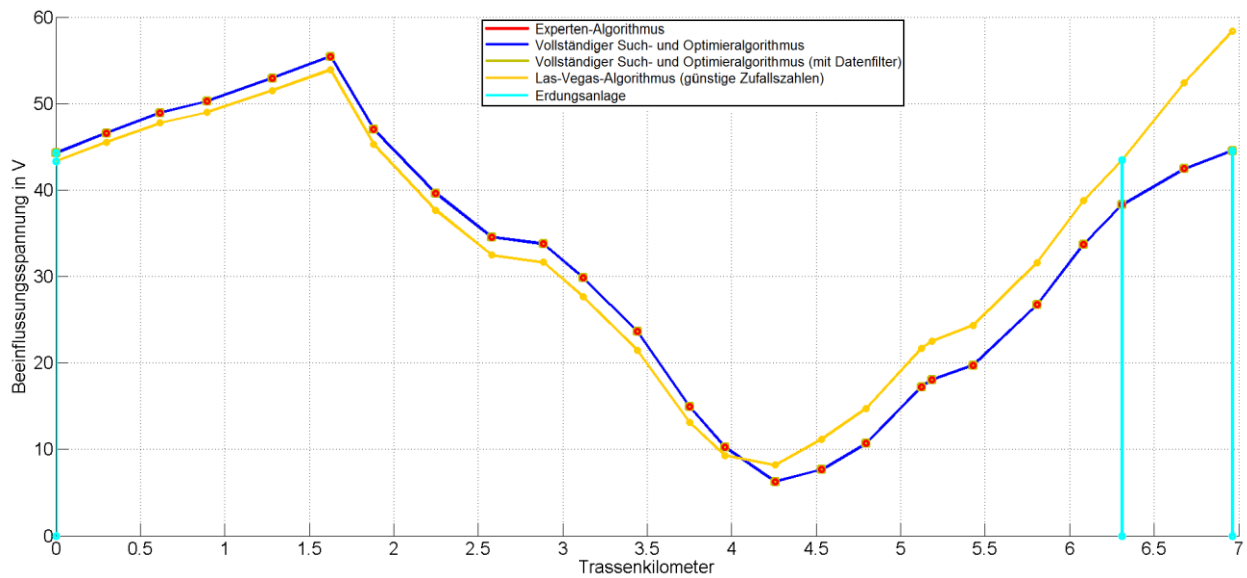


Abbildung 7-7: Beurteilung der Spannungsverläufe gemäß TE30 bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes von 1 Ω

Mit der Widerstandsreihe			
Grenzspannung: 10 Volt (CEN/TS 15280) Spannungsverlauf: Abbildung 7-8	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen	Laufzeit in [s]
VSOA	0,9 Ω (0,6 km) ; 1 Ω (7 km)	42222 GE	53,62
VSOA (mit Datenfilter)	0,9 Ω (0,6 km) ; 1 Ω (7 km)	42222 GE	19,46
LVA (bestes Ergebnis)	0,7 Ω (0 km) ; 0,7 Ω (6,7 km)	57143 GE	10,30
Experten-Algorithmus	0,7 Ω (0 km) ; 1 Ω (7 km)	48571 GE	0,17
Mit dem fixen Widerstandswert von 1 Ω			
Grenzspannung: 10 Volt (CEN/TS 15280) Spannungsverlauf: Abbildung 7-9	Widerstandswert auf (Trassenkilometer)	Gesamtkosten aller Erdungsanlagen	Laufzeit in [s]
VSOA	1 Ω (0 km) ; 1 Ω (0,3 km) ; 1 Ω (7 km)	60000 GE	14,04
VSOA (mit Datenfilter)	1 Ω (0 km) ; 1 Ω (0,3 km) ; 1 Ω (7 km)	60000 GE	3,03
LVA (bestes Ergebnis)	1 Ω (0,6 km) ; 1 Ω (3,7 km) 1 Ω (6,3 km)	60000 GE	84,25
Experten-Algorithmus	1 Ω (0 km) ; 1 Ω (1,6 km) 1 Ω (6,7 km) ; 1 Ω (7 km)	80000 GE	0,05

Tabelle 7-25: Analyse der Daten bei einer oberen Grenzspannung von 10 Volt (CEN/TS 15280) bei einem induzierten Strom von 200 Ampere

Um den Spannungsverlauf von Abbildung 7-1 auf eine Spannung von 10 Volt (CEN/TS 15280 für einen spezifischen Bodenwiderstand größer als 25 Ω m) zu optimieren, sind nur zwei Erdungsanlagen notwendig. Damit ist dieses Problem relativ einfach zu berechnen und es herrschen die ähnlichen Bedingungen wie bei der Optimierung von 65 Volt (TE30). Anhand der Tabelle 7-25 ist klar ersichtlich, dass der vollständige Such- und Optimieralgorithmus (VSOA), sowohl mit, als auch ohne Datenfilter, das beste Ergebnis berechnet (siehe Abbildung 7-8). Da das Problem einfach zu berechnen ist, ist die Laufzeit des Algorithmus mit 19 bzw. 54 Sekunden relativ kurz, daher ist dieser Algorithmus für dieses Problem die beste Wahl. Der Las-Vegas-Algorithmus (LVA) hat aufgrund ungünstiger Zufallszahlen das schlechteste Ergebnis bei Verwendung der Widerstandsreihe erzielt. Beim Experten-Algorithmus wird eine sehr geringe Laufzeit erreicht, jedoch sind die Gesamtkosten um 15 % höher. Der Nachteil des VSOA, die höhere Laufzeit, ist also in diesem Fall vernachlässigbar.

Die Berechnungen für einen fixen Widerstandswert mit 1 Ω zeigen, dass diese zwar sehr schnell durchführbar sind, aber auch die meisten Kosten verursachen. Bei Betrachtung von Abbildung 7-9 zeigt sich, dass trotz höherer Kosten keine Verbesserung der Optimierung erreicht werden kann.

Aus diesem Grund ist die Widerstandsreihe zu bevorzugen, durch sie entstehen weniger Kosten bei der Optimierung.

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Spannungsverläufe für die unterschiedlichen Algorithmen. Die Erdungsanlagen sind als hellblaue, senkrechte Linien eingezeichnet und deren oberen Ende befindet sich ein hellblauer Punkt, welcher direkt auf der anderen Linie eingezeichnet ist. An diesem Trassenkilometer befindet sich die Erdungsanlage für den jeweiligen Algorithmus. Befinden sich jedoch Erdungsanlagen für unterschiedliche Algorithmen am gleichen Trassenkilometer, sind die hellblauen Linien überlagert.

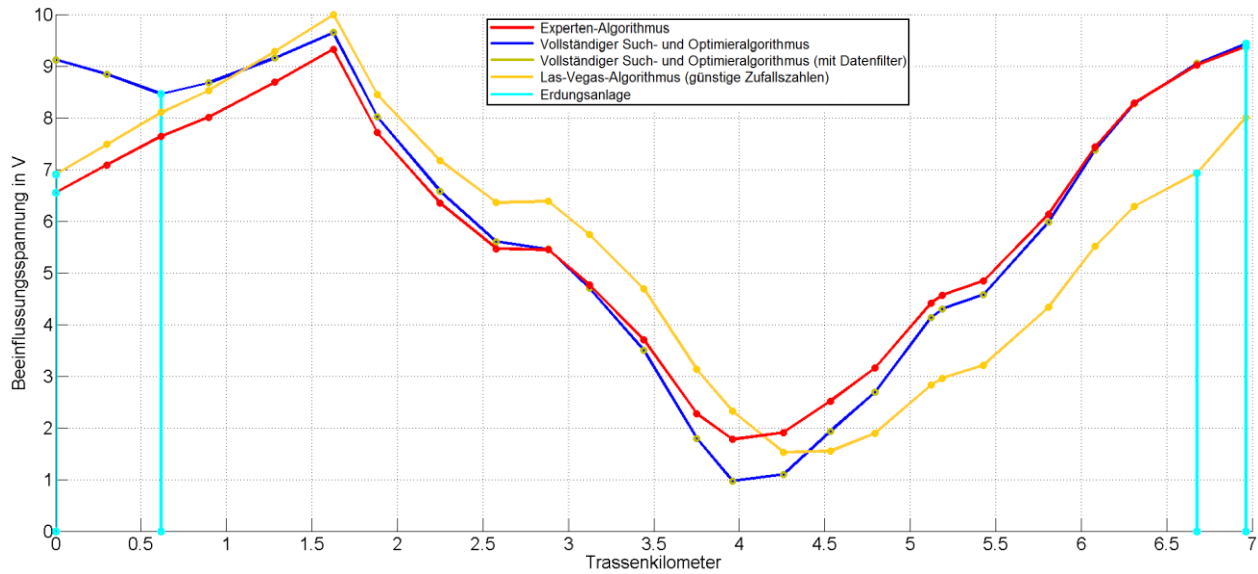


Abbildung 7-8: Beurteilung der Spannungsverläufe gemäß CEN/TS 15280 bei Verwendung der Widerstandsreihe

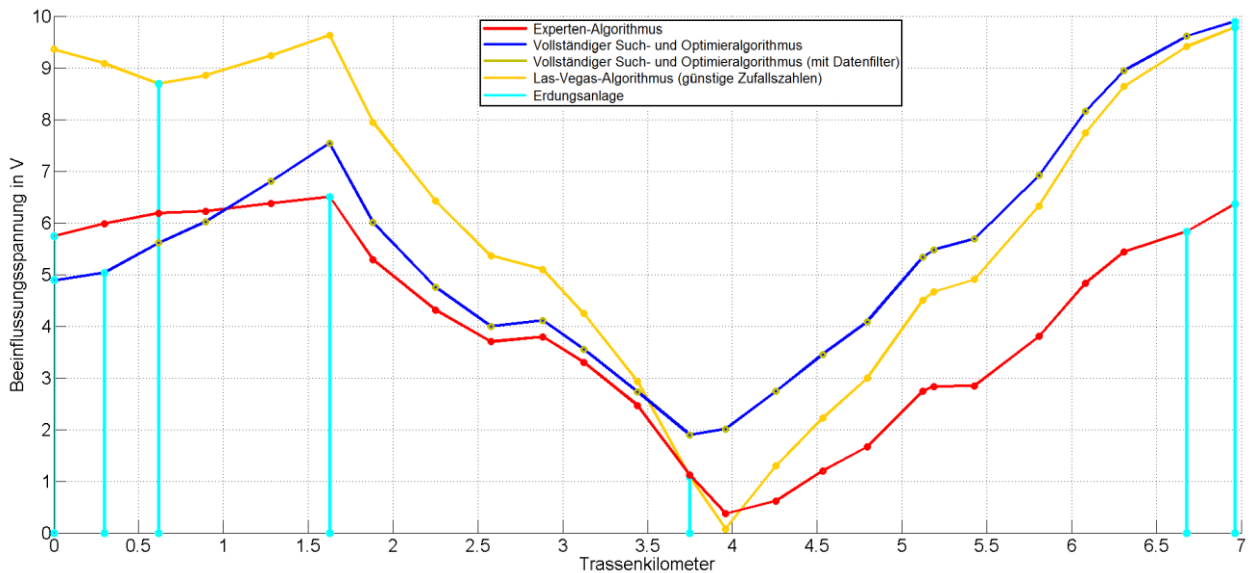


Abbildung 7-9: Beurteilung der Spannungsverläufe gemäß CEN/TS 15280 bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes von 1 Ω

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

8.1. Zusammenfassung

Wie in den vorherigen Kapiteln gezeigt wird, sind Erdungsanlagen ein sehr effektives Instrument, um den Spitzenwert eines Spannungsverlaufs entlang einer Rohrleitung unter eine eingegebene maximale Grenzspannung zu senken. Um diese optimale Verortung (Position und dazugehöriger Widerstandswert der Erdungsanlage) zu erreichen, können sowohl verschiedene Algorithmen als auch unterschiedliche Widerstandsparameter (Widerstandsreihe oder fixer Widerstandswert) verwendet werden.

Schlussendlich kann die optimale Verortung grob in drei verschiedene Schwierigkeitsgrade eingeteilt werden. Obwohl Leitungen mit vielen Knotenpunkten aufwendiger zu berechnen sind, wie es beim vollständigen Such- und Optimieralgorithmus bei Verwendung mit und ohne Datenfilter (15 bzw. 25 Knotenpunkte) der Fall ist, hängt dieser nicht so sehr von der Länge der induktiv beeinflussten Rohrleitung ab, sondern viel mehr von der Anzahl der verwendeten Erdungsanlagen da durch jede zusätzliche Erdungsanlage eine weitere Variable in das Optimierungsproblem gebracht wird.

- **Leichtes Optimierungsproblem**

Beim einfachen Optimierungsproblem werden maximal zwei Erdungsanlagen benötigt, um eine optimale Verortung für eine eingegebene maximale Grenzspannung zu erreichen.

In diesen Fällen ist der vollständige Such- und Optimieralgorithmus bei nahezu allen eingegebenen Grenzspannungen aufgrund optimaler Verortung der Erdungsanlagen die beste Wahl. Zwar ist die Laufzeit des Algorithmus in nahezu allen Fällen wesentlich länger als bei den anderen Algorithmen bei absoluter Betrachtung, ist die Laufzeit trotzdem noch relativ kurz. Wenn der Datenfilter verwendet wird, besteht zwar die Möglichkeit, dass die Ergebnisse bei unglücklicher Verteilung der Zufallszahlen nur suboptimal sind, dafür kann jedoch die Laufzeit verkürzt werden.

Der Las-Vegas-Algorithmus ist aufgrund seines Zufallszahlenprinzips bei einfachen Problemen kaum zu gebrauchen, da der Gewinn an Laufzeit meistens durch schlechtere Ergebnisse wettgemacht wird.

Der Fokus des Experten-Algorithmus liegt in seiner sehr schnellen Laufzeit. Bei wenigen Erdungsanlagen ist dieser Vorteil aber nicht besonders hoch, da der VSOA in dieser Disziplin relativ schnell ist und wesentlich bessere Ergebnisse liefert.

Daher liegt die erste Wahl bei einfachen Problemen beim vollständigen Such- und Optimieralgorithmus.

- **Mittelschweres Optimierungsproblem**

Beim mittleren Optimierungsproblem werden drei bzw. beim Experten-Algorithmus vier Erdungsanlagen verwendet, um unter die eingegebene maximale Grenzspannung zu optimieren. Dieses Problem ist meist wesentlich aufwendiger zu berechnen, daher ist das Finden des optimalen Algorithmus für diese Aufgabenstellung auch schwieriger.

Der vollständige Such- und Optimieralgorithmus hat für die Berechnung der Erdungsanlagen eine lange Laufzeit, die aber noch im akzeptablen Rahmen bleibt, solange die Anzahl der Knotenpunkte der beeinflussten Rohrleitung nicht zu groß wird. In diesem Fall kann mithilfe des Datenfilters bzw. durch händisches aussortieren von Knotenpunkten die Anzahl der Daten und damit die Laufzeit wesentlich reduziert werden. Damit gilt für nicht allzu große Laufzeiten, dass dieser Algorithmus optimal ist, da er immer das beste Ergebnis berechnet außer an bestimmten, schwierig zu berechnenden Grenzspannungen.

Der Las-Vegas-Algorithmus ist bei dieser Problemstellung verwendbar, da er bei einer moderaten Laufzeit oft Ergebnisse berechnet, die relativ nahe am optimalen Ergebnis liegen. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass aufgrund der Zufallszahlen auch sein bestes Ergebnis weit von der optimalen Lösung entfernt sein kann. Wenn aber die Länge der beeinflussten Rohrleitung relativ groß ist, dann reduziert sich die Laufzeit wesentlich gegenüber dem VSOA und ist daher für diese Zwecke gut geeignet.

Im konkreten Beispiel des vorherigen Kapitels verwendet der Experten-Algorithmus in Fällen, bei denen drei Erdungsanlagen genügen würden, immer vier Stück davon. Da diese dadurch hochohmiger sind, bildet er fast immer das beste Kostenergebnis. Durch seine Optimiercharakteristik ist dieser Algorithmus in allen Fällen sehr schnell und der Benutzer erhält dadurch die Möglichkeit, verschiedene Default-Widerstandswerte zu testen, um ein noch besseres Kostenergebnis zu erzielen.

Daher ist hier die erste Wahl: bei kleinen Rohrleitungslängen der vollständige Such- und Optimieralgorithmus, bei vielen Knoten der Experten-Algorithmus und beim Las-Vegas-Algorithmus stellt die Zufallskomponente ein Risiko dar, kann aber eine gute Lösung bei einer passablen Laufzeit erreichen.

- **Schwieriges Optimierungsproblem**

Hier gilt, dass eine Vielzahl von Erdungsanlagen verwendet wird. Die Anzahl beginnt bei vier bzw. für den Experten –Algorithmus bei fünf Anlagen.

Der vollständige Such- und Optimieralgorithmus hat aufgrund der Anzahl an möglichen Kombinationen eine Laufzeit (diese steigt exponentiell), die sehr hoch ist. Daher können keine

schwierigen Probleme mit diesem Algorithmus berechnet werden, es sei denn, die Anzahl der Knotenpunkte wird mithilfe des Datenfilters auf ein Minimum reduziert.

Für den Las-Vegas-Algorithmus gilt dasselbe. Wenn die Anzahl der Knotenpunkte durch händisches deaktivieren klein gehalten werden kann, dann kann dieser Algorithmus noch verwendet werden. Ansonsten steigt seine Laufzeit ebenfalls in sehr große Höhen ohne Gewissheit, ob er die Aufgabenstellung bedingt durch die Zufallskomponenten gut löst.

Bei schweren Optimierungsproblemen ist die Laufzeit des Experten-Algorithmus noch immer sehr schnell und dieser ist damit der einzige Algorithmus, mit dem in kurzer Zeit ein Ergebnis berechnet werden kann. Jedoch gilt auch hier, dass der Default-Widerstandswert optimiert werden muss, um ein gutes Kostenergebnis zu erhalten. Der Nachteil liegt darin, dass der Algorithmus bei bestimmten Grenzspannungen mehr Erdungsanlagen benötigt als die anderen Algorithmen, ein gutes Beispiel dafür findet sich in Tabelle 7-10.

Daher die erste Wahl: der Experten-Algorithmus, da die anderen Algorithmen die Aufgabenstellungen nur mehr mit extrem langer Laufzeit oder mit Einschränkungen berechnen können.

Bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes von 1Ω anstatt der Widerstandsreihe reduziert sich die Laufzeit im Normalfall um einen beachtlichen Faktor. Dieser ist bei niedrigen Laufzeiten noch nicht entscheidend, bei Verwendung mehrerer Erdungsanlagen kann aber dadurch ein Vorteil entstehen. Der schwere Nachteil liegt nicht nur darin, dass durch diese Methode die Optimierungskosten wesentlich höher sind als bei Verwendung der Widerstandsreihe, sondern auch, dass bei bestimmten maximalen Grenzspannungen mehr Erdungsanlagen für die Optimierung verwendet werden müssen als bei der Verwendung einer Widerstandsreihe. Daher ist die Verwendung des fixen Widerstandswertes von 1Ω nur in Ausnahmefällen der Widerstandsreihe vorzuziehen.

Zusammenfassend lautet das Ergebnis, dass es unterschiedliche Optimierungsprobleme gibt, bei denen die verschiedenen Algorithmen ihre Vorteile aufzeigen können. So ist der vollständige Such- und Optimieralgorithmus bei leichteren, der Experten-Algorithmus bei schwierigeren Aufgaben die erste Wahl. Der Las-Vegas-Algorithmus folgt durch die Zufallszahlen einer Normalverteilung und kann dadurch ein gutes oder ein schlechtes bestes Ergebnis bekommen, auch wenn er mehrmals ausgeführt wird.

8.2. Ausblick

Die Algorithmen können zum Teil noch weiter optimiert werden. Beim Experten-Algorithmus kann der Benutzer den Default (Vorgabe)-Widerstandswert auswählen und dadurch sowohl die Anzahl der Erdungsanlagen als auch das Kostenergebnis beeinflussen. Dieser Teil könnte automatisiert werden, indem ein zusätzlicher Algorithmus die fertige Berechnung nochmals bearbeitet und testet, ob die Default-Widerstandswerte so zu optimieren sind, dass sie hochohmiger und dadurch kostengünstiger werden. Der Nachteil wäre jedoch, dass sich die Laufzeit mit steigender Erdungsanlagenanzahl unwesentlich erhöht. Durch diese Maßnahme wäre der Algorithmus dann eine Mischung aus Experten-Algorithmus und vollständiger Such- und Optimieralgorithmus mit einem Datenfilter, welcher nahezu alle Daten herausfiltert.

Beim Las-Vegas-Algorithmus kann die Anzahl der Versuche mit einer bestimmten Anzahl an Erdungsanlagen reduziert werden, um so die Laufzeit zu senken. Andererseits besteht bei bestimmten Grenzspannungen die Möglichkeit, dass keine Lösung mit einer bestimmten Anzahl an Erdungsanlagen gefunden wird, obwohl eine vorhanden ist.

Sowohl beim vollständigen Such- und Optimieralgorithmus als auch beim Las-Vegas-Algorithmus könnte ein selbstständig agierender Datenfilter eingebaut werden, welcher ohne Vorgaben des Benutzers die Anzahl an Daten auswählt, die wichtig für die Optimierung sind. Um solch einen adaptiven Datenfilter jedoch realisieren zu können, ist es notwendig, sehr viele unterschiedliche theoretische und praktische Spannungsverläufe zu untersuchen.

9 VERZEICHNISSE

9.1. Literatur und Quellen

- [1] René Braunstein, Ernst Schmutzer, Mario Ölz, *Neue Herausforderungen an die induktive Rohrleitungsbeeinflussung unter Berücksichtigung des aktuellen Forschungsstands*. 11. Symposium Energieinnovation in Graz, Österreich, 2010.
- [2] René Braunstein, *Technical and economical evaluation of measures decreasing inductive interference of metallic pipelines*. Arbeitstitel, Dissertation: Institut für Elektrische Anlagen, TU Graz, 2011.
- [3] TE 30: Technische Empfehlung Nr. 30, *Maßnahmen bei Bau und Betrieb von Rohrleitungen im Einflussbereich von Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1kV.*: Technisches Komitee für Beeinflussungsfragen (VEÖ), 04/1987.
- [4] ÖNORM CEN/TS 15280, *Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit durch Wechselstrom an erdverlegten Rohrleitungen - Anwendung für kathodisch geschützte Rohrleitungen*. März 2006.
- [5] ÖVE EN 50122-1, *Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen. Teil: Schutzmaßnahmen in Bezug auf elektrische Sicherheit und Erdung*. 1997.
- [6] prEN 50351:2003, *Entwurf: Grundnorm für die Berechnungs- und Messverfahren bezogen auf die Beeinflussung von Telekommunikationssystemen durch elektrische Energieversorgungs- und Bahnstromsysteme*. 2003.
- [7] Working Group 36.02, *Guide on the influence of high voltage ac power systems on metallic pipelines*. Paris, Frankreich: CIGRE, 1995.
- [8] Muckenhuber, *Elektrische Anlagen 1*. Graz, Österreich: Institut für Elektrische Anlagen, TU Graz, 1984.
- [9] Ernst Schmutzer, René Braunstein, "Lösungsansätze zur Reduktion der Wechselstromkorrosionswahrscheinlichkeit von induktiv beeinflussten Rohrleitungen durch Traktionsströme elektrischer Bahnanlagen," *e&i- Elektrotechnik und Informationstechnik-Magazin, "Bahntechnik"*, Nummer 6, Juni 2009.
- [10] Ernst Schmutzer, *Elektromagnetische Verträglichkeit elektronischer Systeme, Vorlesungsskript*. Graz, 2010.

- [11] Ernst Schmutzner, *Niederfrequente Beeinflussung technischer Systeme durch elektrische Anlagen.*: Vorlesungsskript an der TU Graz, 2004.
- [12] Herbert Schmole, Dieter Vogt, *Potentialausgleich, Fundamenterder, Korrosionsgefährdung*, 6. Edition, Berlin, Deutschland: VDE Verlag GmbH, 2004.
- [13] Wieland Thomas, Schweighart Jörg, Schwaiger Michael, "Korrosion und Pourbai-Diagramme," *Elektromagnetische Verträglichkeit elektronischer Systeme*, WS 07/08.
- [14] Büchler M, Voüte C-H., *Der Einfluss der Betriebsbedingungen des kathodischen Korrosionsschutzes auf die Wechselstromkorrosion und Schutzmaßnahmen.*: Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, 2008.
- [15] Ch.E.Leiserson, R.Rivest, C.Stein Th.H.Cormen, *Algorithmen - Eine Einführung*. München: Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH, 2010.
- [16] Wikipedia - Algorithmus. Aufgerufen am 30. Juli 2011.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Algorithmus>
- [17] Wikipedia - Determiniertheit. Aufgerufen am 25. Juli 2011.
http://de.wikipedia.org/wiki/Determiniertheit_%28Algorithmus%29
- [18] Wikipedia - Determinismus. Aufgerufen am 25. Juli 2011.
http://de.wikipedia.org/wiki/Determinismus_%28Algorithmus%29
- [19] P. Fierz. - Algorithmen & Datenstrukturen. Aufgerufen am 27. August 2011.
<https://prof.ti.bfh.ch/sep1/vorlesungen/algodata/xml/algo.xml>
- [20] Wikipedia - Komplexitätstheorie. Aufgerufen am 26. August 2011
<http://de.wikipedia.org/wiki/Komplexit%C3%A4tstheorie>
- [21] Wikipedia - Komplexitätsklassen. Aufgerufen am 26. August 2011.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Komplexit%C3%A4tsklasse>
- [22] Wikipedia - Liste von Komplexitätsklassen. Aufgerufen am 27. August 2011
http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Komplexit%C3%A4tsklassen
- [23] Wikipedia - Paralleler Algorithmus. Aufgerufen am 29. August 2011
http://de.wikipedia.org/wiki/Paralleler_Algorithmus
- [24] J. Carson, "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return," *Bell System Technical Journal*, pp. S. 539-554, 1926.
- [25] F. Pollaczek, "Über die Induktionswirkung einer Wechselstromeinfachleitung," *Elektrische*

Nachrichtentechnik, Nummer 4, 1927.

- [26] D. Oeding, B.R. Oswald, *Elektrische Kraftwerke und Netze*. Berlin-Heidelberg, Deutschland: Springer-Verlag, 2004, Seiten 271-284.
- [27] M. Michailow, Z.D. Rasumov, "Electrical parameters of metallic pipelines in earth," *Električestvo*, vol. 5, pp. 60-63, 1963.
- [28] Muckenhuber, "Die induktive Beeinflussung von Rohrleitungen durch Hochspannungsleitungen," *ÖZE*, Seite 273-280, Juni 1967.
- [29] Paul Bratley Gilles Brassard - Randomized Algorithms. Aufgerufen am 30. August 2011.
http://www1.spms.ntu.edu.sg/~guojian/MAS794/440_401_8_Randomized.pdf
- [30] www.uni-protokolle.de - Randomisierter Algorithmus. Aufgerufen am 31. August 2011.
http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Randomisierter_Algorithmus.html
- [31] Wikipedia - Randomisierter Algorithmus. Aufgerufen am 31. August 2011.
http://de.wikipedia.org/wiki/Randomisierter_Algorithmus
- [32] Thomas Hofmeister, *Randomisierte Algorithmen*, 2006.
- [33] Wikipedia - Monte-Carlo-Algorithmus. Aufgerufen am 1. September 2011.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Monte-Carlo-Algorithmus>
- [34] www.uni-protokolle.de - Las-Vegas-Algorithmus. Aufgerufen am 1. September 2011.
<http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Las-Vegas-Algorithmus.html>
- [35] ProgrammingWiki - Probabilistische Algorithmen. Aufgerufen am 2. September 2011.
http://programmingwiki.de/Probabilistische_Algorithmen
- [36] www.uni-protokolle.de - Monte-Carlo-Algorithmus. Aufgerufen am 3. September 2011
http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Monte-Carlo_Algorithmus.html

9.2. Abbildungen

Abbildung 2-1: Spannungsverlauf entlang einer induktiv beeinflussten Rohrleitung	2
Abbildung 2-2: Spannungsverlauf entlang einer induktiv beeinflussten Rohrleitung alternative Lösung, manuell erstellt	3
Abbildung: 3-1: Schritt- und Berührungsspannungen [7]	6
Abbildung 3-2: Ohmsche Beeinflussung beim Versagen der Isolationsschicht [7]	7
Abbildung 3-3: Kapazitive Beeinflussung einer Fernmeldeleitung durch eine Hochspannungsfreileitung [8]	7
Abbildung 3-4: Beeinflussungsmodell der kapazitive Beeinflussung [8]	7
Abbildung 3-5: Einfaches Beeinflussungsmodell der induktiven Beeinflussung [10], geändert.....	9
Abbildung 3-6: Beeinflussungsmodell der induktiven Beeinflussung mit zwei Rohrleitungen [10], geändert	9
Abbildung 3-7: Allgemeines Beeinflussungsmodell der induktiven Beeinflussung [8]	10
Abbildung 3-8: Variation der Widerstandswerte von Erdungsanlagen (Anlehnung an eine Abbildung in [9])	11
Abbildung 3-9: Einfluss der Bodenfeuchtigkeit auf den spezifischen Bodenwiderstand [12].....	12
Abbildung 3-10: Jahreszeitliche Schwankung des spezifischen Bodenwiderstandes [12]	13
Abbildung 3-11: Ausbreitungswiderstand eines Tiefenerders [1].....	14
Abbildung 3-12: Ausbreitungswiderstand eines Horizontalerders [1]	15
Abbildung 3-13: Spannungsverlauf bei unterschiedlichen Isolierkupplungen (Anlehnung an eine Abbildung in [9]).....	16
Abbildung 3-14: pH-Wertverschiebung durch Kathodischen Schutz [12]	17
Abbildung 3-15: Kriterium für die Notwendigkeit der Prüfung von Beeinflussungsmöglichkeiten bei Hochspannungsleitung [3].....	20
Abbildung 4-1: Bsp. Wäsche waschen.....	21
Abbildung 4-2: Einteilung der Komplexitätsklassen	24
Abbildung 4-3: Wachstumsfunktionen von Kurven	24
Abbildung 5-1: Elektrisches Ersatzschaltbild einer Rohrleitung [1].....	30
Abbildung 5-2: Kettenleiter-Ersatzschaltbild einer induktiv beeinflussten Rohrleitung [1]	31
Abbildung 5-3: Rohrleitungspotentialverlauf ohne reduzierende Maßnahmen.....	32

Abbildung 5-4: Rohrleitungspotentialverläufe mit unterschiedlicher Verortung von Erdungsanlagen	33
Abbildung 5-5: Kosten von Wechselstromerdungsanlagen	35
Abbildung 5-6: Verwendete Programmoberfläche	36
Abbildung 6-1: Flussdiagramm für die Variation von Position und Widerstandswert von Erdungsanlagen inklusive eingezeichneten Verlaufspfaden	42
Abbildung 6-2: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten ohne Erdungsanlagen.....	46
Abbildung 6-3: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten mit zwei Erdungsanlagen ohne Filterung der maximalen Spannung.....	47
Abbildung 6-4: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten mit zwei Erdungsanlagen mit Filterung der maximalen Spannung.....	47
Abbildung 6-5: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkte mit zwei Erdungsanlagen, technisch-wirtschaftliche optimale Lösung	48
Abbildung 6-6: Flussdiagramm für den vollständigen Such- und Optimieralgorithmus	49
Abbildung 6-7: Rechenzeit für die Variation von zwei Erdungsanlagen bei unterschiedlichen Rohrleitungsknotenpunkte.....	52
Abbildung 6-8: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten ohne Erdungsanlagen.....	57
Abbildung 6-9: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und zwei Erdungsanlagen; Las-Vegas-Algorithmus, eine mögliche Lösung	57
Abbildung 6-10: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und zwei Erdungsanlagen; Las-Vegas-Algorithmus, zehn mögliche Lösungen	58
Abbildung 6-11: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und zwei Erdungsanlagen; Las-Vegas-Algorithmus, beste Lösung aus zehn verschiedenen Möglichkeiten	59
Abbildung 6-12: Flussdiagramm des Las-Vegas-Algorithmus	60
Abbildung 6-13: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten ohne Erdungsanlagen; Expertensystem – markierte Spitzen.....	62
Abbildung 6-14: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten ohne Erdungsanlagen; Expertensystem – markierte höchste Spannung vorne	63
Abbildung 6-15: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und einer Erdungsanlagen; Expertensystem – die Erdungsanlage mit 4 Ω	63
Abbildung 6-16: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und einer Erdungsanlagen; Expertensystem – Erdungsanlage mit allen Variationen der Widerstandsreihe	64

Abbildung 6-17: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und zwei Erdungsanlagen; Expertensystem – erste Erdungsanlage auf 4 Ω , zweite mit allen Variationen der Widerstandsreihe	65
Abbildung 6-18: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und zwei Erdungsanlagen; Expertensystem – erste Erdungsanlage auf 1 Ω , zweite mit allen Variationen der Widerstandsreihe	65
Abbildung 6-19: Spannungsverlauf mit 7 Knotenpunkten und zwei Erdungsanlagen; Expertensystem - finales optimiertes Ergebnis	66
Abbildung 6-20: Flussdiagramm für den Experten-Algorithmus.....	67
Abbildung 7-1: Analyse der Algorithmen, keine Optimierung.....	69
Abbildung 7-2: Kostenanalyse der berechneten Lösungen der Algorithmen bei Verwendung der Widerstandsreihe.....	76
Abbildung 7-3: Laufzeiten der Algorithmen bei Verwendung der Widerstandsreihe bei unterschiedlichen eingegebenen oberen Grenzspannungen.....	81
Abbildung 7-4: Kostenanalyse der berechneten Lösungen der Algorithmen bei Verwendung des fixen Widerstandswertes von 1 Ω	86
Abbildung 7-5: Laufzeitanalyse der Algorithmen bei Verwendung des fixen Widerstandswertes	90
Abbildung 7-6: Beurteilung der Spannungsverläufe gemäß TE30 bei Verwendung der Widerstandsreihe	93
Abbildung 7-7: Beurteilung der Spannungsverläufe gemäß TE30 bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes von 1 Ω	93
Abbildung 7-8: Beurteilung der Spannungsverläufe gemäß CEN/TS 15280 bei Verwendung der Widerstandsreihe.....	95
Abbildung 7-9: Beurteilung der Spannungsverläufe gemäß CEN/TS 15280 bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes von 1 Ω	95
Abbildung A-1: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 118 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird	109
Abbildung A-2: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 104,7 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird.....	109
Abbildung A-3: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 104,6 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird.....	110
Abbildung A-4: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 100 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird	110
Abbildung A-5: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 70 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird	111

Abbildung A-6: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 50 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird	111
Abbildung A-7: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 36,5 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird	112
Abbildung A-8: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 36,4 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird	112
Abbildung A-9: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 35 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird	113
Abbildung A-10: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 31 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird	113
Abbildung A-11: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 29,6 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird	114
Abbildung B-1: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 118 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird	114
Abbildung B-2: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 100 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird	115
Abbildung B-3: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 70 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird	115
Abbildung B-4: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 52 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird	116
Abbildung B-5: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 50 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird	116
Abbildung B-6: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 48 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird	117
Abbildung B-7: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 40 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird	117
Abbildung B-8: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 35 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird	118
Abbildung B-9: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 32 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird	118

9.3. Tabellen

Tabelle 3-1: Schwankungsbreite und Durchschnittswerte von spezifischen Erdwiderständen [12]	13
---	----

Tabelle 3-2 :Wirkung von Korrosionsströme (Gleichstrom) [12]	18
Tabelle 3-3: Grenzwerte für Rohrleitungspotentiale	19
Tabelle 4-1 Ausführungszeiten von Algorithmen [19]	27
Tabelle 6-1: Unterschied zwischen einem Widerstandwert und Widerstandsreihe	40
Tabelle 6-2: Ausschnitt aus der Erdungselemente-Setzreihenfolge	41
Tabelle 6-3: Übersicht über alle Lösungen, die unter der maximal vorgegebenen Grenzspannung sind ..	48
Tabelle 6-4: Rechenzeit für die Variation von zwei Erdungsanlagen bei unterschiedlichen Rohrleitungsknotenpunkte.....	51
Tabelle 6-5: Rechenzeit für die Variation von drei Erdungsanlagen bei unterschiedlichen Rohrleitungsknotenpunkte.....	51
Tabelle 6-6: Vergleich zwischen MCA und LVA.....	56
Tabelle 6-7: Übersicht über die ersten zehn möglichen Lösungen des LVA	58
Tabelle 7-1: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 118 Volt.....	71
Tabelle 7-2: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 104,7 Volt.....	71
Tabelle 7-3: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 104,6 Volt.....	72
Tabelle 7-4: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 100 Volt.....	72
Tabelle 7-5: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 70 Volt.....	72
Tabelle 7-6: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 50 Volt.....	73
Tabelle 7-7: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 36,5 Volt.....	73
Tabelle 7-8: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 36,4 Volt.....	74
Tabelle 7-9: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 35 Volt.....	74
Tabelle 7-10: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 31 Volt.....	75

Tabelle 7-11: Analyse der Daten bei Verwendung der Widerstandsreihe bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 29,6 Volt.....	75
Tabelle 7-12: Laufzeiten der Algorithmen bei Verwendung der Widerstandsreihe bei unterschiedlichen eingegebenen oberen Grenzspannungen.....	78
Tabelle 7-13: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 118 Volt	82
Tabelle 7-14: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 100 Volt	82
Tabelle 7-15: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 70 Volt	83
Tabelle 7-16: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 52 Volt	83
Tabelle 7-17: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 50 Volt	83
Tabelle 7-18: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 48 Volt	84
Tabelle 7-19: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 40 Volt	84
Tabelle 7-20: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 35 Volt	84
Tabelle 7-21: Analyse der Daten bei Verwendung eines fixen Widerstandswertes mit 1 Ω bei einer vorgegebenen oberen Grenzspannung von 32 Volt	85
Tabelle 7-22: Laufzeiten der Algorithmen bei Verwendung des fixen Widerstandswertes von 1 Ω bei unterschiedlichen eingegebenen oberen Grenzspannungen.....	88
Tabelle 7-23: Vergleich der zwei Widerstands-Berechnungsmethoden	91
Tabelle 7-24: Analyse der Daten bei einer oberen Grenzspannung von 65 Volt (TE30) bei einem induzierten Strom von 1000 Ampere.....	92
Tabelle 7-25: Analyse der Daten bei einer oberen Grenzspannung von 10 Volt (CEN/TS 15280) bei einem induzierten Strom von 200 Ampere.....	94

ANHANG A WIDERSTANDSREIHE

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Spannungsverläufe für die unterschiedlichen Algorithmen. Die Erdungsanlagen sind als hellblaue, senkrechte Linien eingezeichnet und deren oberen Ende befindet sich ein hellblauer Punkt, welcher direkt auf der anderen Linie eingezeichnet ist. An diesem Trassenkilometer befindet sich die Erdungsanlage für den jeweiligen Algorithmus. Befinden sich jedoch Erdungsanlagen für unterschiedliche Algorithmen am gleichen Trassenkilometer, sind die hellblauen Linien überlagert.

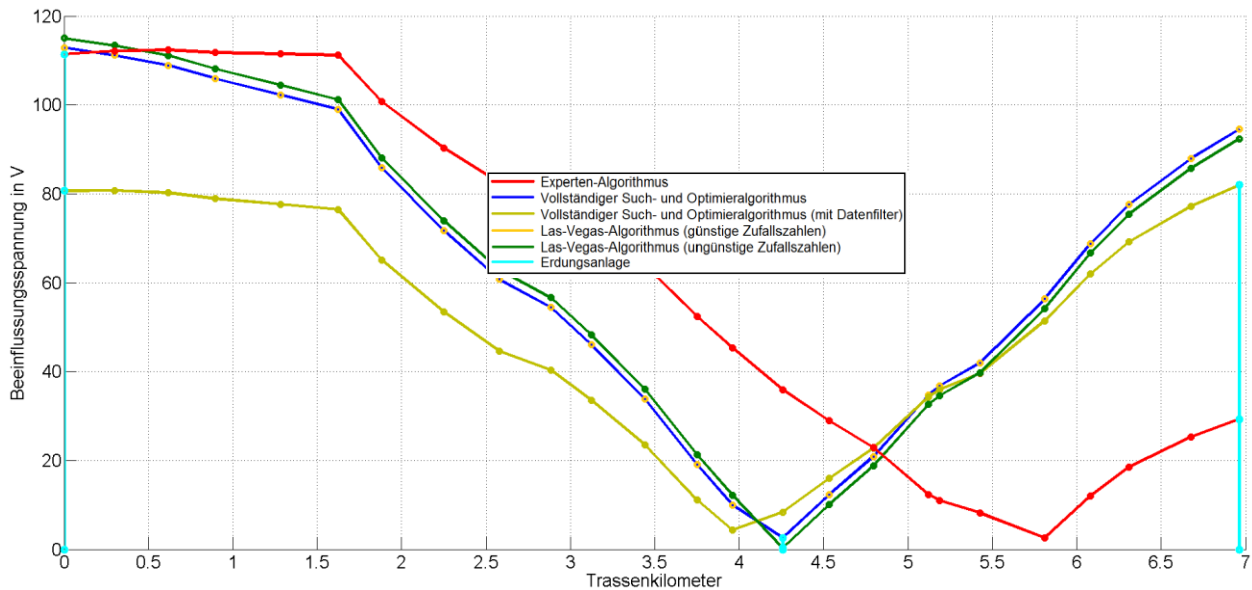


Abbildung A-1: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 118 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird

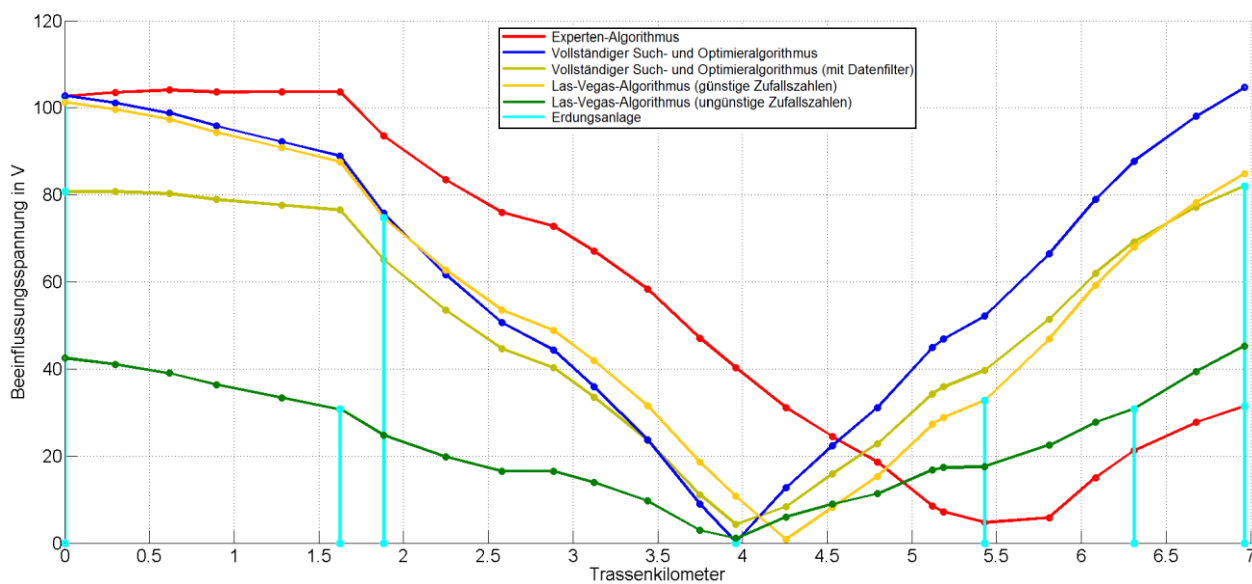


Abbildung A-2: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 104,7 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird

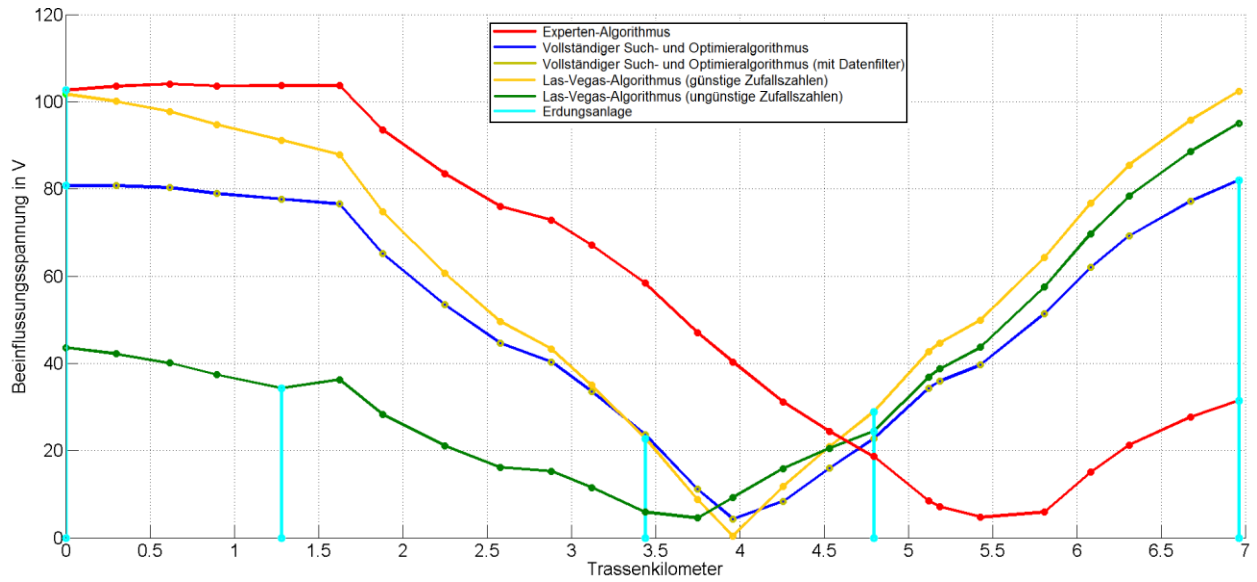


Abbildung A-3: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 104,6 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird

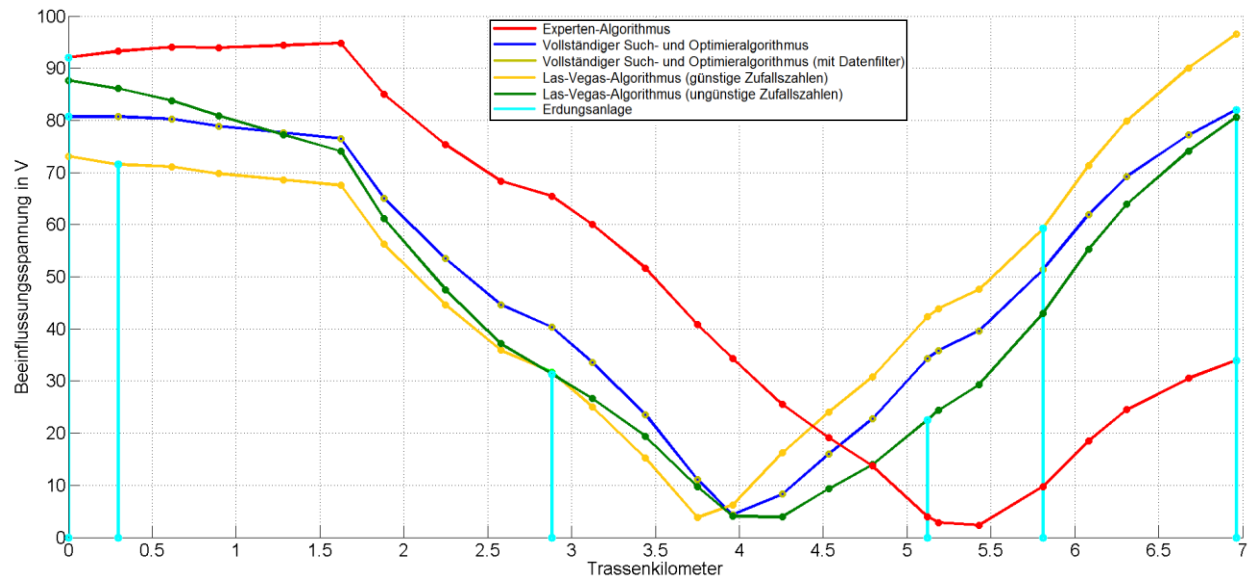


Abbildung A-4: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 100 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird

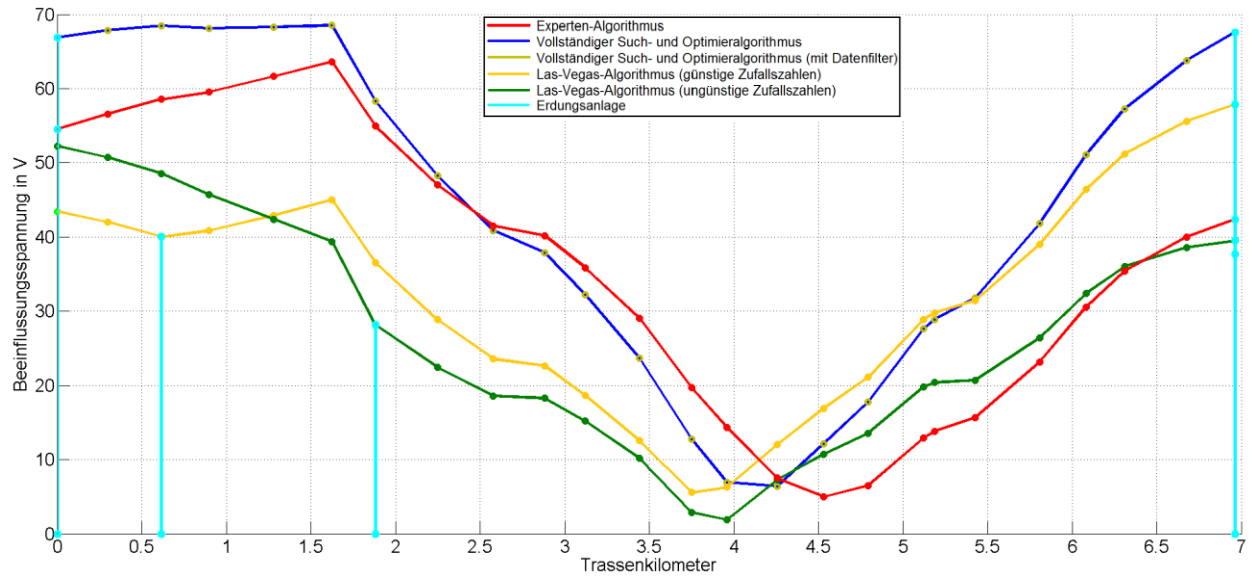


Abbildung A-5: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 70 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird

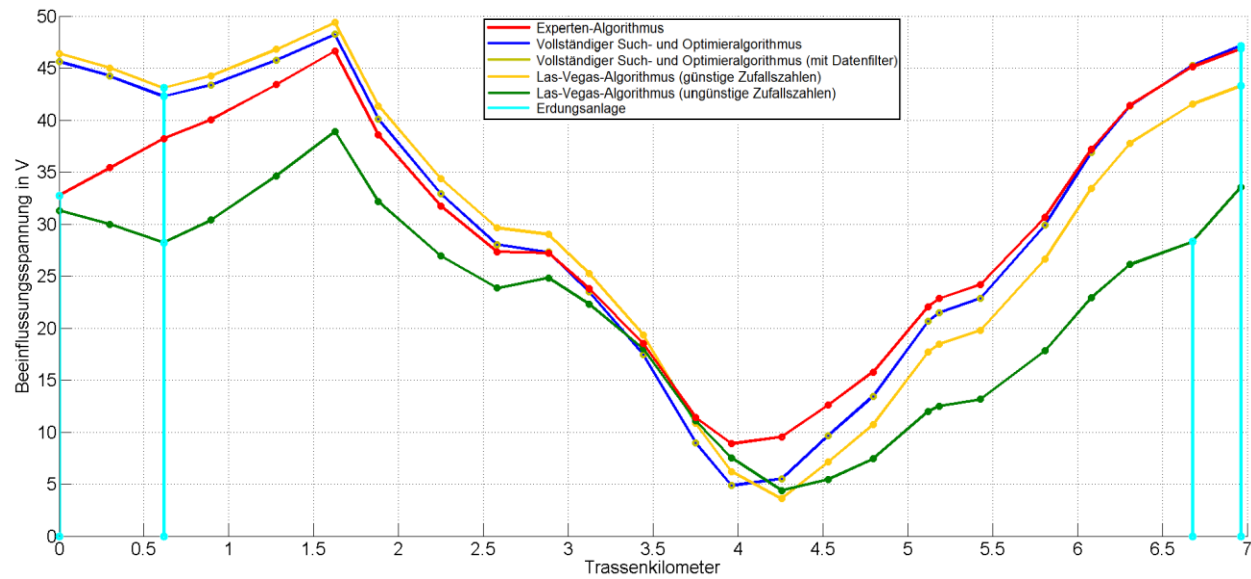


Abbildung A-6: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 50 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird

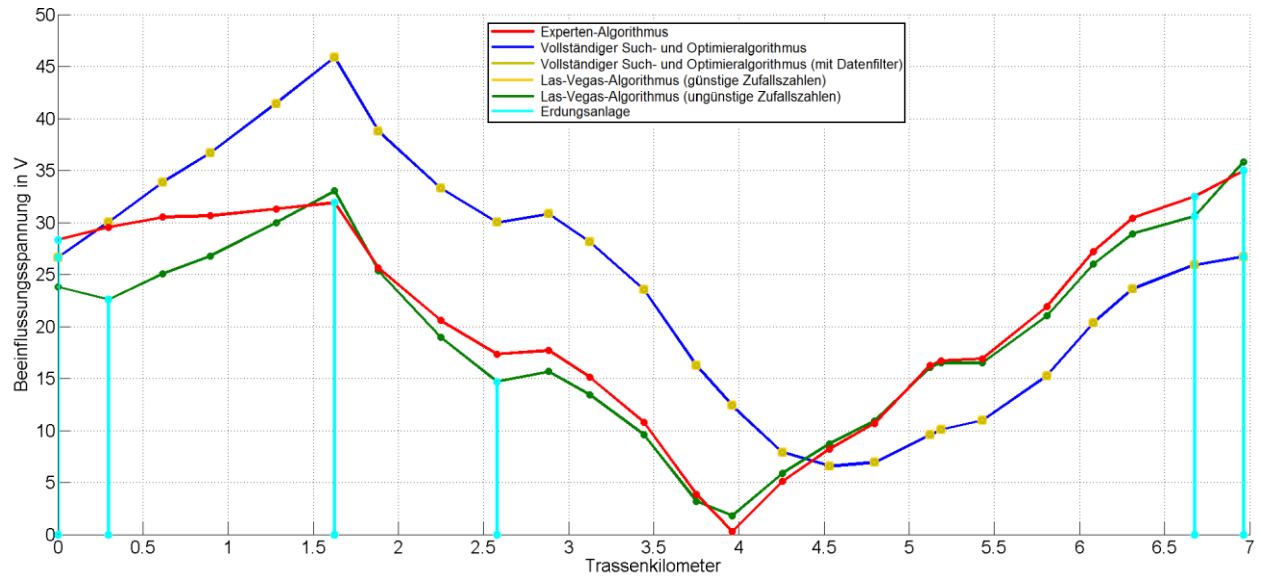


Abbildung A-7: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 36,5 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird

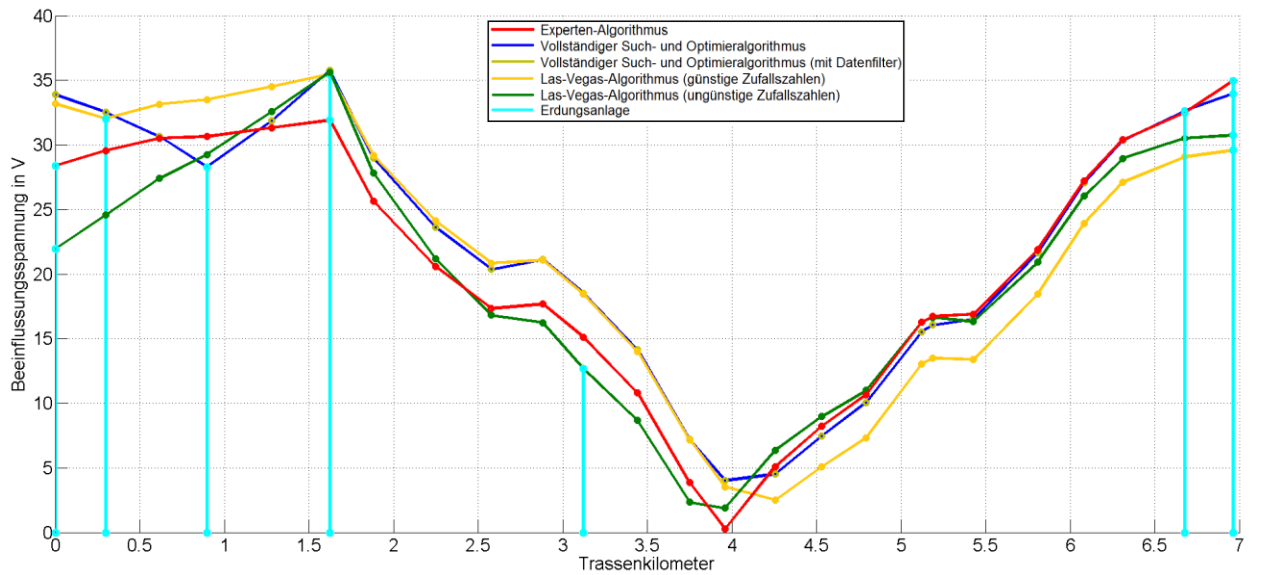


Abbildung A-8: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 36,4 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird

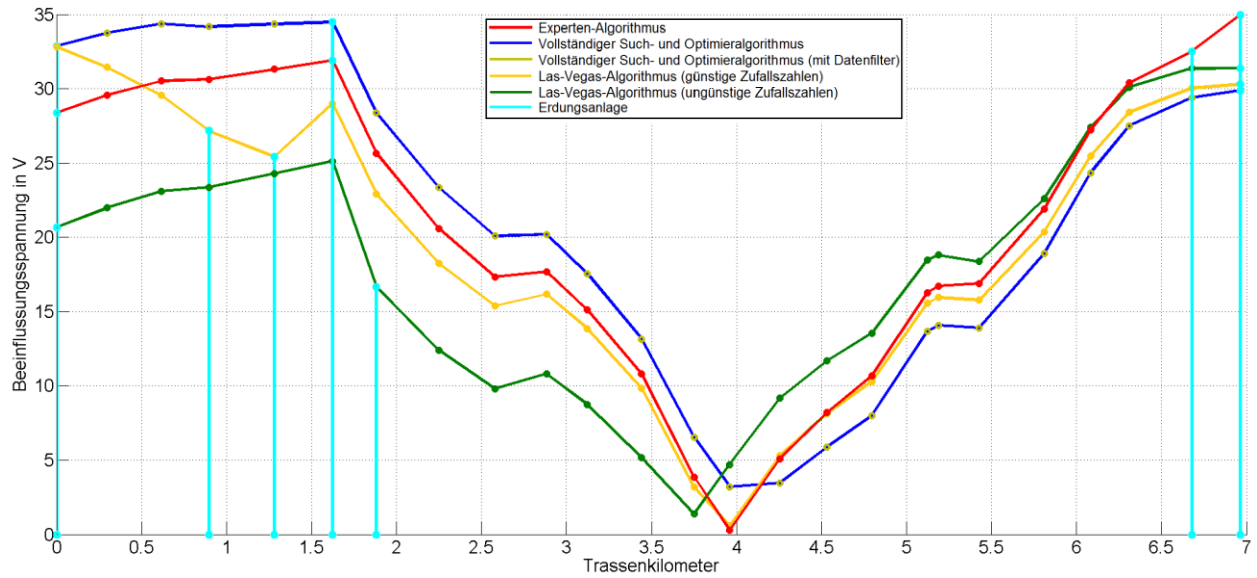


Abbildung A-9: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 35 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird

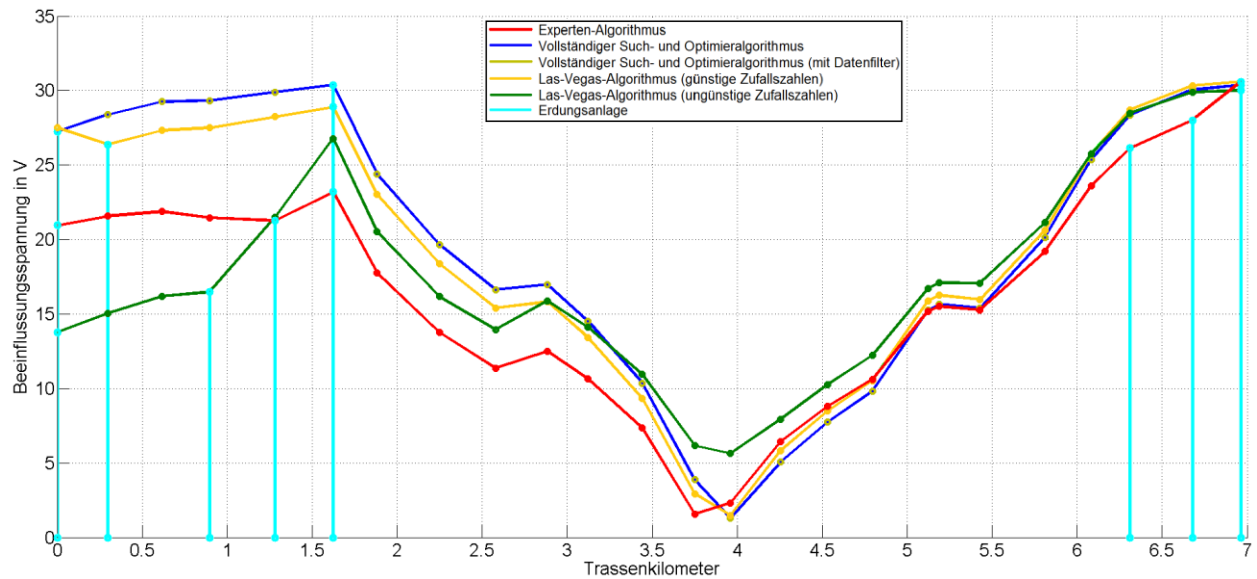


Abbildung A-10: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 31 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird

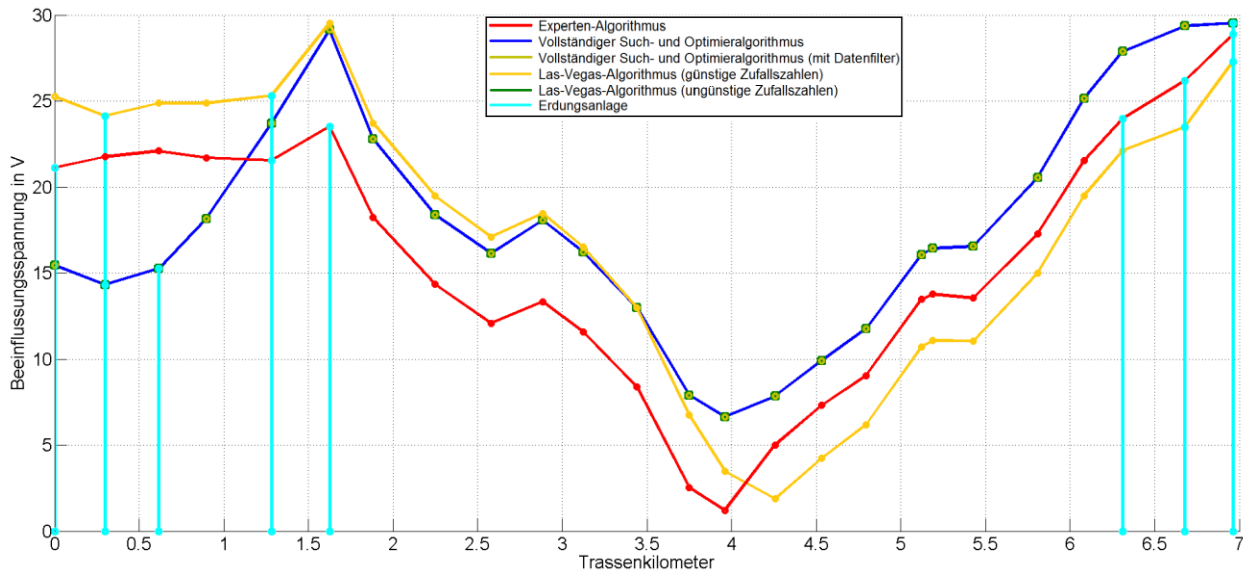


Abbildung A-11: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 29,6 Volt, wenn die Widerstandsreihe verwendet wird

ANHANG B FIXER WIDERSTANDSWERT VON 1 Ω

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Spannungsverläufe für die unterschiedlichen Algorithmen. Die Erdungsanlagen sind als hellblaue, senkrechte Linien eingezeichnet und deren oberes Ende befindet sich ein hellblauer Punkt, welcher direkt auf der anderen Linie eingezeichnet ist. An diesem Trassenkilometer befindet sich die Erdungsanlage für den jeweiligen Algorithmus. Befinden sich jedoch Erdungsanlagen für unterschiedliche Algorithmen am gleichen Trassenkilometer, sind die hellblauen Linien überlagert.

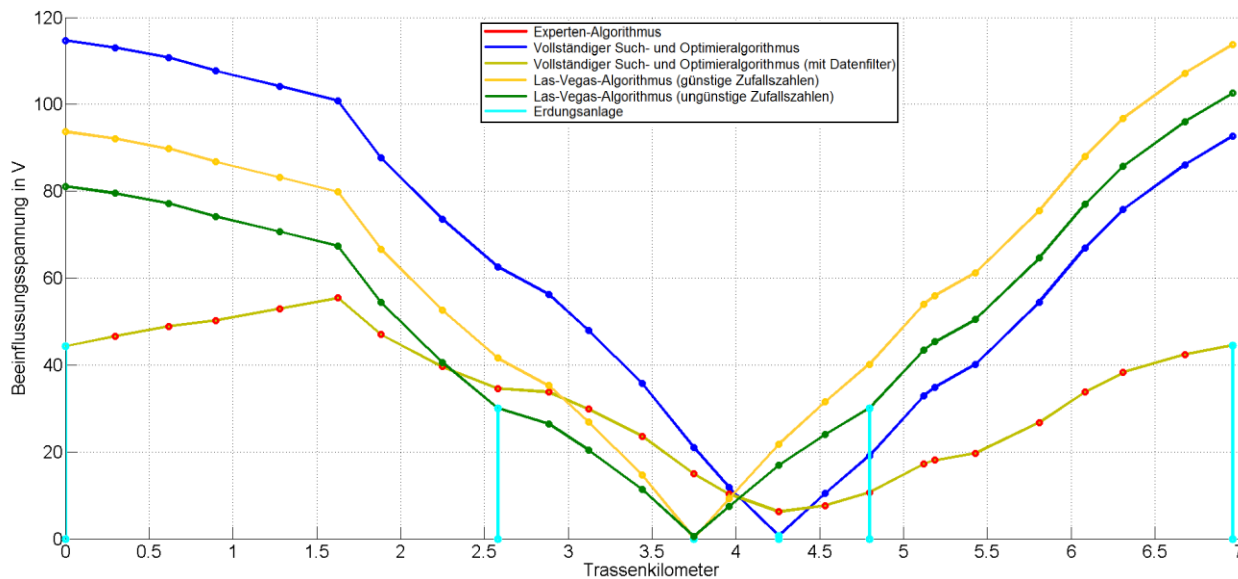


Abbildung B-1: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 118 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird

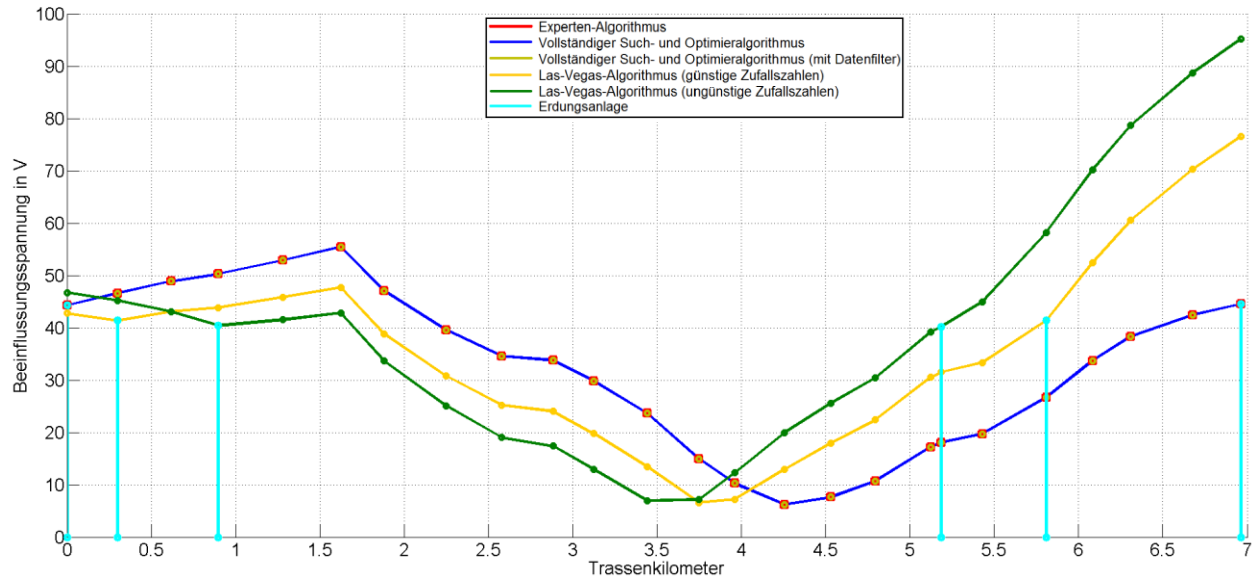


Abbildung B-2: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 100 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird

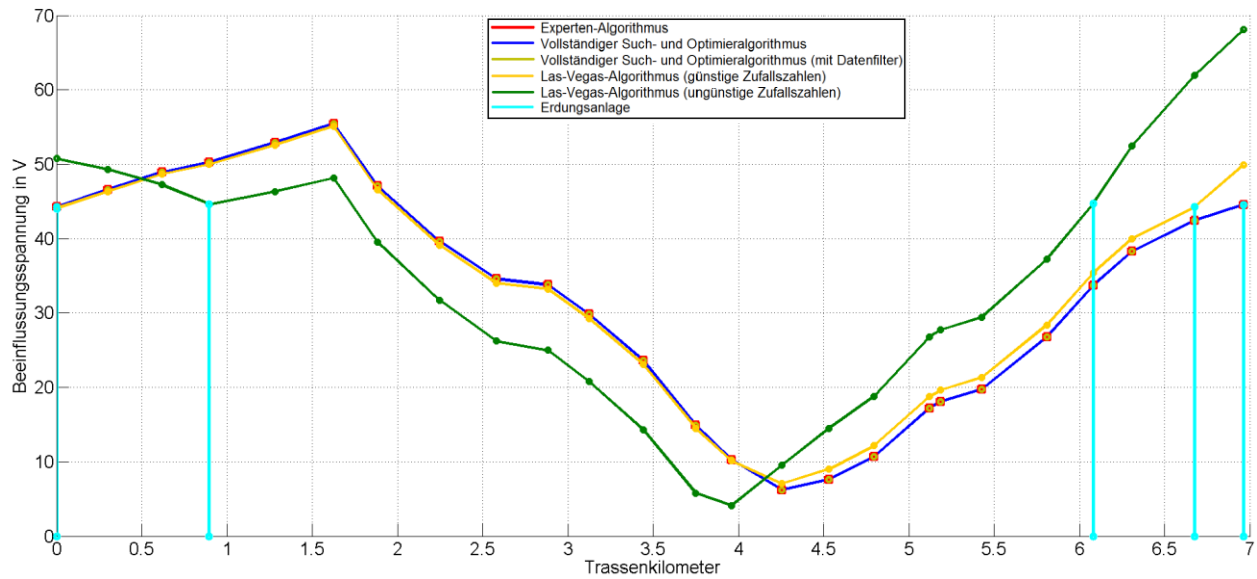


Abbildung B-3: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 70 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird

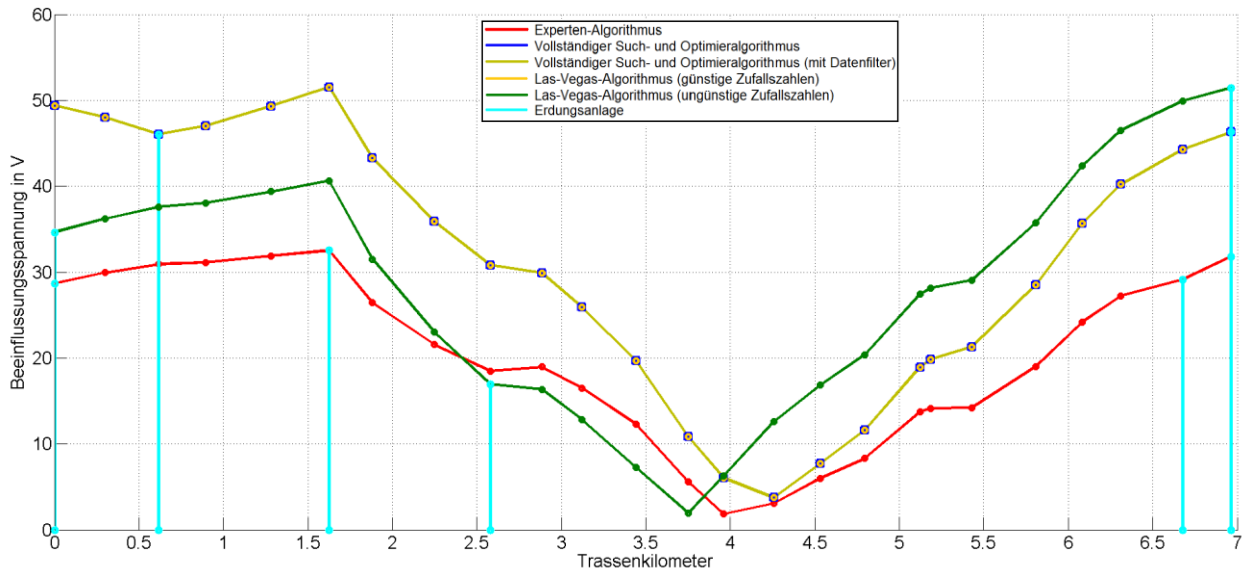


Abbildung B-4: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 52 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird

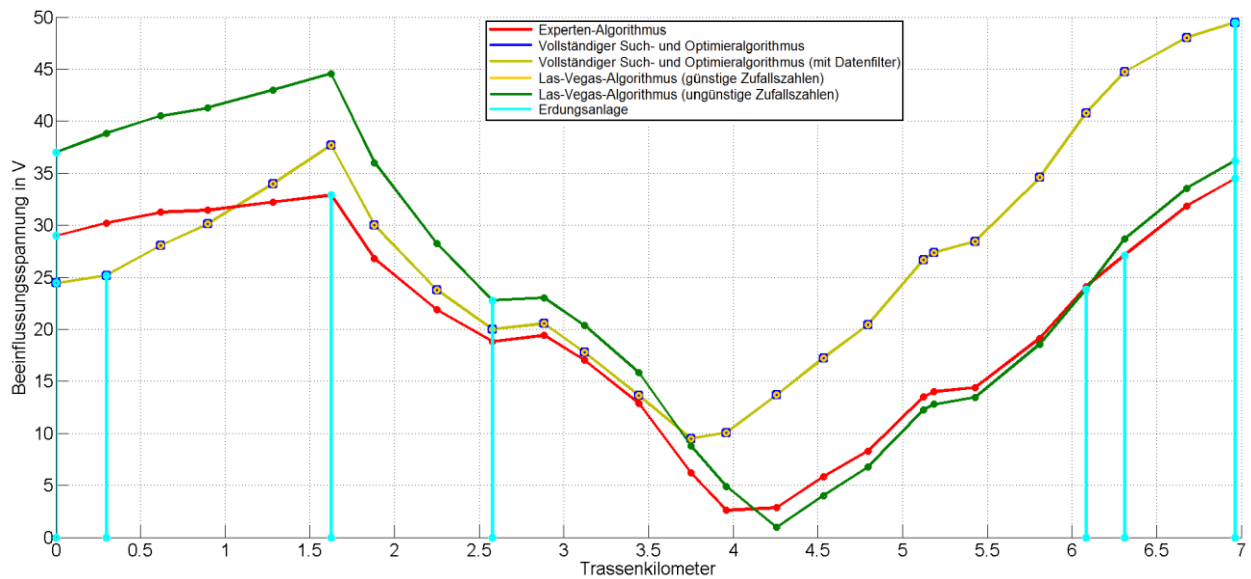


Abbildung B-5: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 50 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird

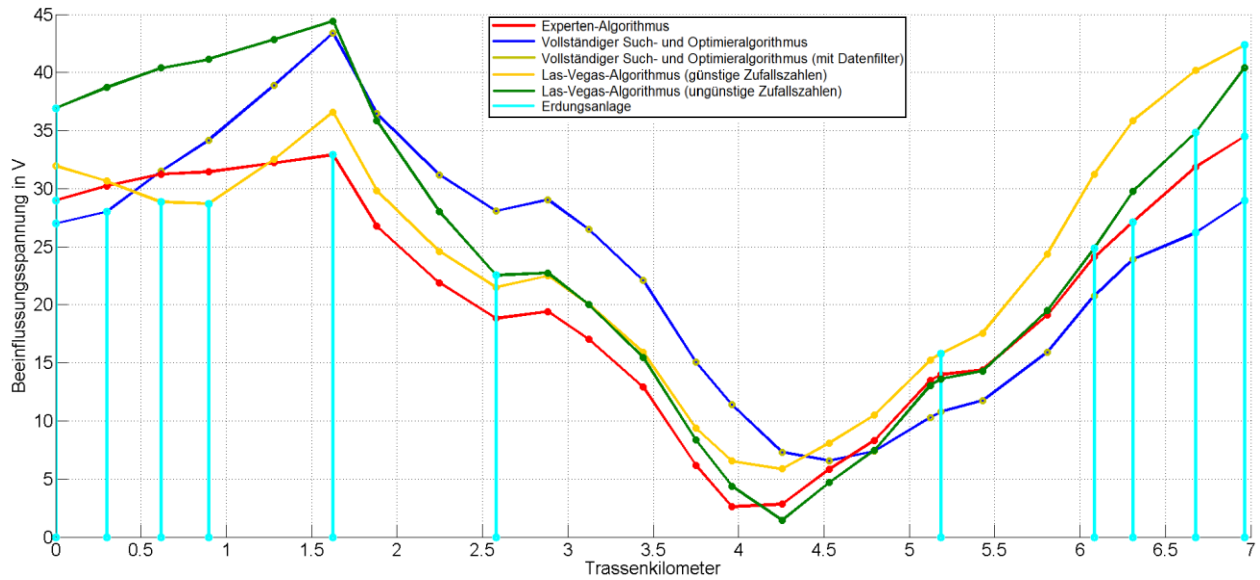


Abbildung B-6: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 48 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird

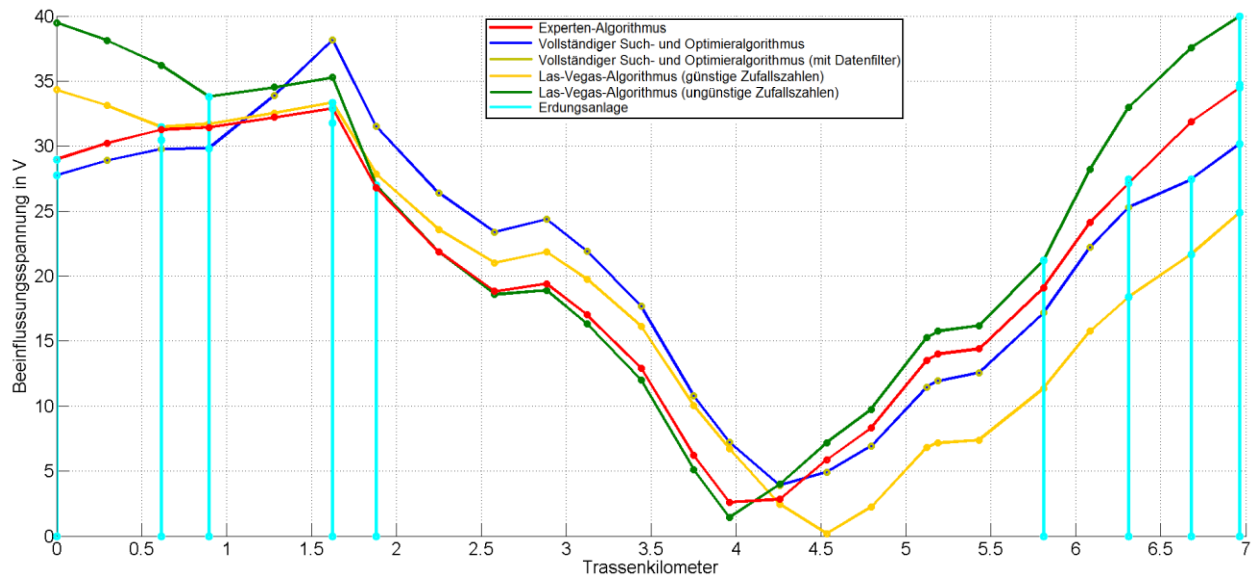


Abbildung B-7: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 40 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird

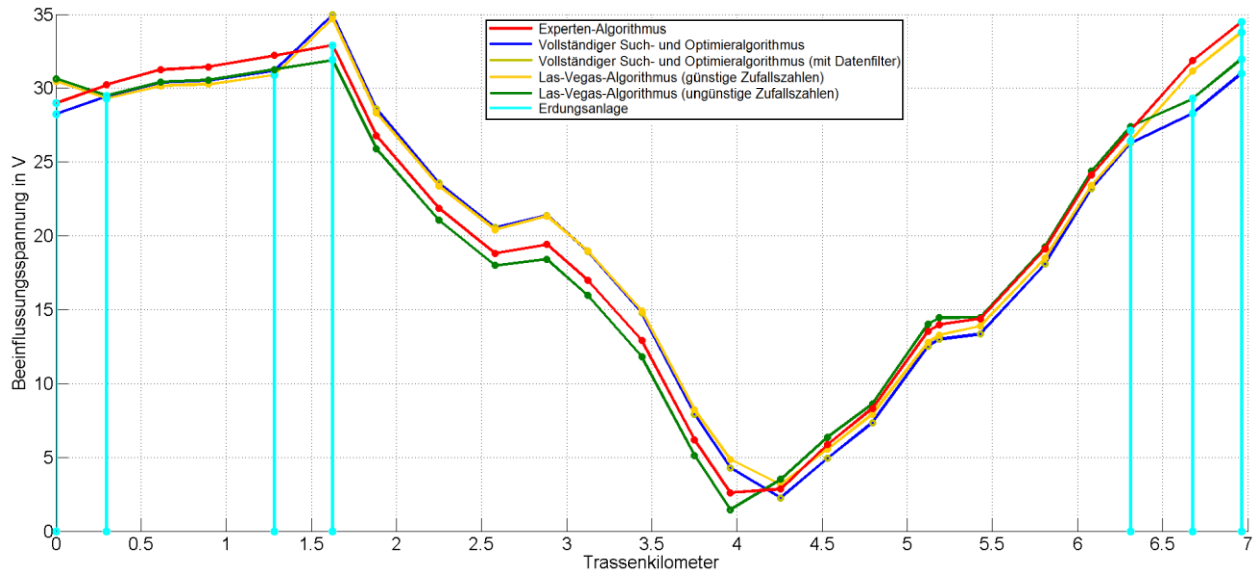


Abbildung B-8: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 35 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird

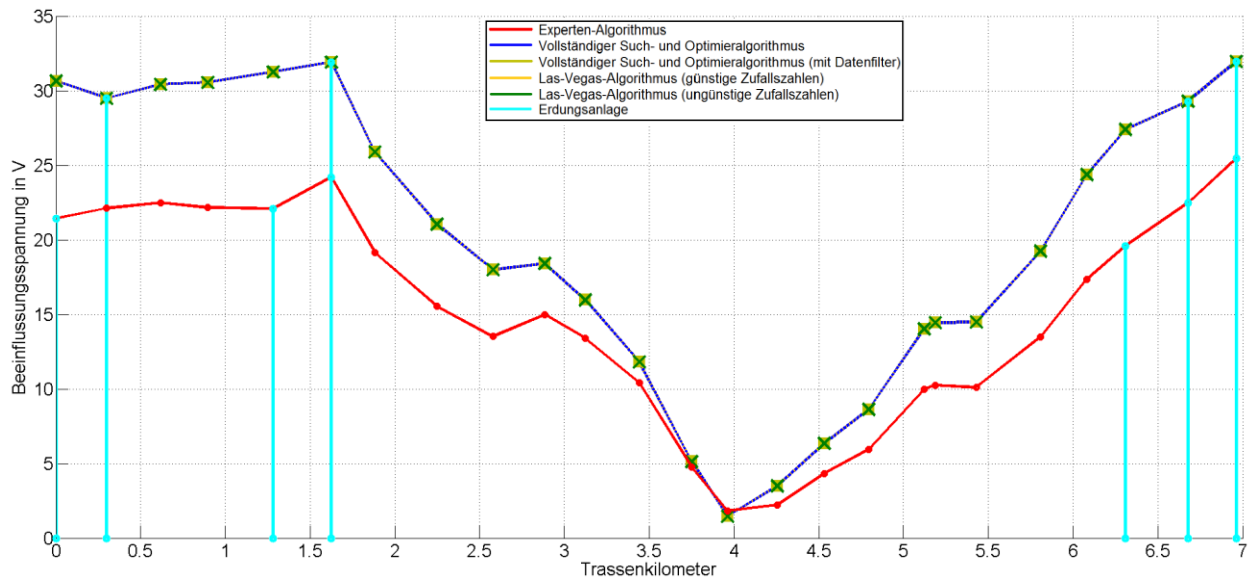


Abbildung B-9: Beurteilung der Spannungsverläufe bei einer oberen Grenzspannung von 32 Volt, wenn ein fixer Widerstandswert von 1 Ω verwendet wird