



Christoph Philip Haberng, BSc

# **Modellierung von Übertragungsleitungen in einer transienten Netzsimulation für die Schutzprüfung**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium

Elektrotechnik

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

## **Betreuer**

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing Dr.techn. Herwig Renner

Institut für Elektrische Anlagen und Netze

Dipl.-Ing. Thomas Hensler, Omicron electronics

Graz, Juni 2020

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum, Unterschrift

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Thomas Hensler, der meine Masterarbeit betreut hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Herwig Renner für die Betreuung und Begutachtung meiner Masterarbeit.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für mich hatten.

## Kurzfassung

Bei der korrekten Nachbildung des realen Verhaltens von langen Übertragungsleitungen weisen Leitungsmodelle für transiente Vorgänge eine hohe Komplexität auf. In der vorliegenden Masterarbeit werden Übertragungsleitungsmodelle unterschiedlicher Komplexität miteinander verglichen und hinsichtlich der Anforderungen einer Anwendung in der Schutzprüfung untersucht. Es handelt sich hierbei um einen Leitungsschutz, welcher im Zeitbereich mit Momentanwerten arbeitet. Durch den Vergleich der in der firmeneigenen Software der Firma Omicron electronics GmbH implementierten Übertragungsleitungsmodelle mit anderen Anwendungen, wie z.B. Matlab/Simulink, wird die bestehende Implementierung validiert und Verbesserungsvorschläge werden im Anschluss erarbeitet. Dafür wird ein Übertragungsleitungsmodell weiterentwickelt, welches für simulaltungsbasierte Prüfungen im Zeitbereich geeignet ist. Das derzeit verwendete Übertragungsleitungsmodell von Omicron electronics GmbH basiert auf konzentrierten Leitungsparametern. Ein solches Modell ist nur für kurze Übertragungsleitungen gültig. Daher wird auf ein Übertragungsleitungsmodell mit verteilten Leitungsparametern übergegangen. Durch die Annahme der verteilten Leitungsparameter, die den Maxwell'schen Telegraphengleichungen zugrunde liegt, ist es möglich, die Ortsabhängigkeit der Zustandsgrößen zu berücksichtigen und die Laufzeit der Wanderwelle zu modellieren. Abschließend wird ein Anwendungsbeispiel für eine Schutzsystemprüfung mit neuester Relais-technologie, basierend auf einer transienten Simulation des neuen Übertragungsmodells, demonstriert.

## Abstract

When correctly replicating the real behavior of long transmission lines, the transmission line models of transient processes are highly complex. The following master's thesis compares models of transmission lines with different levels of complexity and analyzes them regarding the requirements for an application in protection testing, which is in this case a line protection that works in time domain with current values. By comparing the transmission line models implemented in the software developed by the company Omicron electronics GmbH to other applications, e.g. Matlab/Simulink, their current implementation is being validated, and subsequently, suggestions for possible improvements are outlined. Therefore, a transmission line model was further developed in order to suit tests based on simulations in time domain. The transmission line model currently used by Omicron electronics GmbH is based on lumped parameters. Those models are valid for short transmission lines only. Hence, switching to a transmission line model with distributed line parameters was necessary. Due to the assumption of distributed line parameters underlying Maxwell's Telegrapher's equation, it is possible to consider the state variables' location dependency and model the runtime of the travelling wave. In conclusion, an example of application of protection testing with the latest relay technology, based on a transient simulation of the new transmission model, is demonstrated.

## Abkürzungsverzeichnis

A	Ampere
C	Gesamtkapazität
C'	Kapazitätsbelag
CDA	Critical Damping Adjustment
DC	Direct Current
dz	Wegelement in z-Richtung
dt	Zeitelement
E	Elektrische Feldstärke
f	Frequenz
$f_{\pi,max}$	Maximal zu untersuchende Frequenz
G	Gesamtleitwert
G'	Leitwertbelag
GPS	Globales Positionsbestimmungssystem
H	Magnetische Feldstärke
hist	Vergangenheitswert der dynamisch passiven Elemente
Hz	Hertz
i	Wechselgröße Strom (Zeitbereich)
$\underline{I}$	Komplexer Strom (Frequenzbereich)
$i_{anf}$	Strom am Anfang der Leitung
$i_{end}$	Strom am Ende der Leitung
$\underline{I}_r$	Stromkonstante einer rücklaufenden Welle
$\underline{I}_v$	Stromkonstante einer vorlaufenden Welle
$l$	Leitungslänge
L	Gesamtinduktivität
L'	Induktivitätsbelag
LL	Leitungslänge
ms	Millisekunden

R	Gesamtwiderstand
$R'$	Widerstandsbelag
s	Transformationsmatrix für symmetrische Komponenten
$s^{-1}$	Inverse Transformationsmatrix für symmetrische Komponenten
t	Zeit
T	Transformationsmatrix für Diagonalkomponenten
$T^{-1}$	Inverse Transformationsmatrix für Diagonalkomponenten
$T, \tau$	Laufzeit der Wanderwelle
TD21	Incremental-Quantity Distance Element
TD32	Incremental-Quantity Directional Element
TW32	Travelling Wave Directional Element
TW87	Travelling Wave Differential Scheme
TWLPT	Laufzeit
u	Wechselgröße Spannung (Zeitbereich)
$\underline{U}$	Komplexe Spannung (Frequenzbereich)
$u_{anf}$	Spannung am Anfang der Leitung
$u_{end}$	Spannung am Ende der Leitung
$\underline{U}_r$	Spannungskonstante einer rücklaufenden Welle
$u_r(x + vt)$	Funktion der Spannung einer rücklaufenden Welle
$\underline{U}_v$	Spannungskonstante einer vorlaufenden Welle
$u_v(x - vt)$	Funktion der Spannung einer vorlaufenden Welle
$\underline{U}_q$	Quellenspannung
V	Volt
Y	Komplexe Admittanz
$Y'$	Komplexer Admittanzbelag
$Y_{phy}$	Admittanzmatrix mit physikalischen Größen der Haupt- bzw. Nebendiagonale
$Y_{pos}$	Mitsystem der Admittanzmatrix
$Y_{sym}$	Admittanzmatrix mit symmetrischen Komponenten

$Y_{\text{zero}}$	Nullsystem der Admittanzmatrix
$Y_{\alpha,\beta,0}$	Admittanzmatrix mit Diagonalkomponenten
$X$	Induktiver Gesamtblindwiderstand der Leitung
$X'$	Induktiver Bildwiderstandsbelag der Leitung
$Z$	Komplexe Impedanz
$Z'$	Komplexer Impedanzbelag
$Z_w$	Wellenwiderstand
$\underline{Z}_w$	Komplexer Wellenwiderstand
$\underline{\gamma}$	Komplexe Wellenausbreitungskonstante
$\Delta t$	Zeitschritt der Simulation
$\Delta x$	Wegelement in x-Richtung
$\epsilon_r$	Relative Dielektrizitätskonstante
$\lambda$	Wellenlänge
$\Phi'$	Magnetischer Flussbelag
$v$	Lichtgeschwindigkeit
$\omega$	Kreisfrequenz

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Gliederung der Arbeit.....	1
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1	Lösungsmethoden für ein lineares Netzwerk .....	3
2.1.1	Knotenadmittanzverfahren .....	3
2.1.2	Numerische Integration .....	6
2.1.3	Modaltransformation .....	8
2.2	Leitungsmodellierung von Übertragungsleitungen .....	10
2.2.1	Leitungsparameter.....	10
2.2.2	Allgemeine Leitungsgleichungen.....	11
2.2.3	Stationäre Lösung.....	13
2.2.4	Transiente Lösung.....	15
<b>3</b>	<b>Bestehende Modellierung in Relay Sim Test mit konzentrierten Elementen .....</b>	<b>20</b>
3.1	Implementierung der numerischen Lösungsmethode .....	20
3.2	Implizite-Euler-Methode.....	23
3.3	Aktuelles Leitungsmodell in RelaySimTest .....	24
3.4	Simulation .....	25
3.4.1	Repräsentative Beispiele .....	25
3.4.2	Einfluss der Anzahl der $\Gamma$ - Segmente.....	31
<b>4</b>	<b>Entwicklung eines verteilten Leitungsmodells.....</b>	<b>33</b>
4.1	Implementierung .....	33
4.1.1	Erweiterung der Queue .....	37
4.1.2	Integrierung der Leitungsverluste .....	39
4.2	Vergleich der Leitungsmodelle und Verifikation der implementierten numerischen Berechnungsmethode.....	43
4.2.1	Vergleich der Modelle anhand von repräsentativen Fehlerfällen .....	43



4.2.2	Vergleich der numerischen Rechenmethoden anhand des Modells R-2 .....	57
<b>5</b>	<b>Prüfung eines Leitungsschutzes mit Wanderwellenerkennung</b> .....	<b>60</b>
5.1	Einführung in ein Schutzrelais mit Wanderwellenerkennung .....	60
5.2	Messaufbau .....	66
5.3	Messergebnisse.....	69
<b>6</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>75</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>77</b>

# 1 Einführung

## 1.1 Motivation

Der Relaischutz ist ein wesentliches Element des Stromversorgungssystems, das einen stabilen Betrieb des Energiesystems gewährleistet und den Lebenszyklus teurer elektrischer Geräte verlängert. Schutzprüfungen im Energiesystem sind erforderlich, um Fehlfunktionen des Schutzsystems zu minimieren. Durch Entwicklungen bei Messsystemen und der Hardware des Schutzrelais können neue Schutzalgorithmen im Zeitbereich Momentanwerte von Strom bzw. Spannung anstelle von Strom- bzw. Spannungszeigern verarbeiten und so die Leistung des Schutzsystems verbessern. Herkömmliche Ansätze der Schutzprüfung, die auf Einspeisung von Strom- und Spannungssignalen mit stationären Zeigern basieren, sind für das Prüfen der neuen Schutzalgorithmen im Zeitbereich nicht mehr praktikabel. Daher muss eine transiente Simulationslösung für die Schutzprüfung entwickelt werden. Bei einer transienten Netzsimulation von Leitungen gibt es eine Vielzahl von komplexen Modellen, die das reale Verhalten auch von langen Übertragungsleitungen physikalisch korrekt nachbilden sollen. Die Motivation der Arbeit besteht darin, ein bereits existierendes Leitungsmodell der firmeneigenen Software weiterzuentwickeln und Verbesserungsvorschläge für die Implementierung zu erarbeiten. Übertragungsmodelle unterschiedlicher Komplexität sollen miteinander hinsichtlich der Anforderungen für eine Anwendung in der Schutzprüfung untersucht werden. Die Ergebnisse der Arbeit sollen teilweise in RelaySimTest, einem kommerziellen Softwaretool, für transiente Netzsimulationen für Schutzsystemprüfungen verwendet werden.

## 1.2 Gliederung der Arbeit

Zur Weiterentwicklung eines bereits existierenden Leitungsmodelles weist diese Arbeit folgende Gliederung auf:

Kapitel 2 gibt einen theoretischen Hintergrund zur Modellierung von Übertragungsleitungen. Hierbei wird zunächst auf Grundlagen der Modellierung eingegangen. Es werden für eine transiente Simulation eines linearen Netzwerkes Lösungsmethoden aufgezeigt und im Weiteren Leitungsmodelle hinsichtlich deren unterschiedlicher Methoden durch konzentrierte und verteilte Parameter detailliert erklärt.

Kapitel 3 gibt eine Einführung in das bereits existierende Leitungsmodell des firmeneigenen Softwaretools RelaySimTest. Es wird der aktuelle Stand aufgezeigt, außerdem soll eine transiente Simulation des Leitungsmodelles bei verschiedenen Szenarien durchgeführt werden und mit anderen elektromagnetischen transienten Anwendungsprogrammen verglichen werden.

Das neu entwickelte Leitungsmodell mit verteilten Parametern wird in Kapitel 4 vorgestellt. Es beschreibt die Weiterentwicklungen und Unterschiede zum bisher existierenden Leitungsmodell. Des Weiteren wird der Einfluss der verschiedenen Ansätze zur Integrierung der Leitungsverluste im Zeitbereich untersucht. Es werden Simulationsergebnisse des neu entwickelten Leitungsmodells bei

verschiedenen Simulationsszenarien gezeigt. Im Anschluss werden diese Ergebnisse mit dem bereits existierenden Leitungsmodell und einem Referenzmodell gegenübergestellt und miteinander verglichen. Durch einen Vergleich mit einem elektromagnetischen transienten Anwendungsprogramm wird die Korrektheit des neu entwickelten Leitungsmodells überprüft.

Kapitel 5 veranschaulicht einen Leitungsschutz mit Hilfe von hochfrequenten elektromagnetischen Wellen und beschreibt die Grundlagen eines Differentialschutzes. Es zeigt weiters ein Anwendungsbeispiel einer transienten Simulation für die Prüfung eines Schutzsystems, um die Funktionsweise des neu entwickelten Leitungsmodells zu überprüfen.

Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen dieser Arbeit werden in Kapitel 6 zusammengefasst.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Lösungsmethoden für ein lineares Netzwerk

In einem elektrischen Netzwerk, welches passive<sup>1</sup> bzw. dynamische<sup>2</sup> Elemente und Quellen<sup>3</sup> umfasst, können transiente elektromagnetische Phänomene im Zeitbereich aus einem System von Differentialgleichungen beschrieben werden. Das Lösungsverfahren, das für die digitale Simulation von transienten elektromagnetischen Phänomenen verwendet wird, kann grundsätzlich in zwei Kategorien eingeteilt werden. Einerseits in die Lösung mit Hilfe von Zustandsvariablen oder andererseits in das Knotenadmittanzverfahren. Die Methoden unterscheiden sich indem wie die Differentialgleichungen formuliert, diskretisiert und gelöst werden. Programme, die das Knotenadmittanzverfahren zur Simulation von transienten elektromagnetischen Phänomenen in einem linearen elektrischen Netzwerk nützen, sind zum Beispiel elektromagnetische transiente Programme wie EMTP [1], EMTP-ATP Draw [2], MicroTran [3], PSCAD/EMTDC [4], EMTP-RV [5] und auch die firmeneigene Software RelaySimTest von Omicron. Aber auch die Methode der Zustandsvariablen wie zum Beispiel in Matlab/Simulink wird genutzt. Trotz der Unterschiede in der Formulierung sind die Methoden äquivalent. Das heißt, dass sie bei gleicher numerischer Integration und gleichem Zeitdiskretisierungsschritt die gleichen Simulationsergebnisse für ein beliebiges Netzwerk liefern. [6]

Aufgrund der Äquivalenz der beiden Methoden ist es sinnvoll sich nur auf eine Lösungsvariante zu konzentrieren. Da RelaySimTest auf dem Knotenadmittanzverfahren basiert, wird dieses Verfahren im Kapitel 2.1.1 näher erläutert.

#### 2.1.1 Knotenadmittanzverfahren

Mit Hilfe des Knotenadmittanzverfahrens können Differentialgleichungen gelöst werden, die transiente elektromagnetische Phänomene in einem linearen elektrischen Netzwerk beschreiben. Die Methode ist in [1, 7] beschrieben.

Das Knotenadmittanzverfahren für Gleichstrom verwendet das Kirchhoffsche Gesetz um ein System linearer algebraischer Knotengleichungen für ein elektrisches Netzwerk zu erstellen und daraus die Knotenspannungen zu berechnen.

Eine Erweiterung des Knotenadmittanzverfahrens beinhaltet auch dynamisch lineare Elemente. Die Methode beschreibt die Diskretisierung einer gegebenen linearen Differentialgleichung, baut Systeme

---

<sup>1</sup> Passive Elemente sind Elemente im Netzwerk, welche Leistung verbrauchen, z.B. Widerstände.

<sup>2</sup> Dynamische Elemente sind Elemente im Netzwerk, welche Energie speichern können, z.B. Induktivitäten und Kondensatoren.

<sup>3</sup> Quellen sind Elemente im Netzwerk, welche Leistung in ein Netzwerk einspeisen können, z.B. Spannungsquelle oder Stromquelle.

linearer algebraischer Knoten auf und berechnet die Knotenspannungen zu jedem diskreten<sup>4</sup> Zeitpunkt eines Simulationsfensters.

Im einfachsten Fall besteht ein Netzwerk nur aus linearen Elementen. Gemäß dieser Methode berechnet sich zu jedem Zeitpunkt ( $t$ ) einer Simulation in einem linearen elektrischen Netzwerk mit  $n$  Knoten bzw.  $b$  Zweigen, aus einem System mit  $n$  Knotengleichungen, ein Vektor mit vorher unbekanntem Knotenspannungen  $u_A(t)$ .

$$\mathbf{G}_{AA} \cdot u_A(t) = i_A(t) - i_{HA}(t) - \mathbf{G}_{AB} \cdot u_B(t) \quad (2-1)$$

$\mathbf{G}$  ist eine symmetrische reelle Leitwertmatrix aus  $n \times n$  Knoten;

$\mathbf{u}(t)$  ist ein Vektor aus  $n$  Knotenspannungen;

$\mathbf{i}_Q(t)$  ist ein Vektor von  $n$  Stromquellen,

$\mathbf{i}_H(t)$  ist ein Vektor aus  $n$  Stromquellen, repräsentiert die Vergangenheitswerte der dynamischen passiven Elemente;

$\mathbf{A}$  ist eine Menge von Knoten mit unbekanntem Spannungen;

$\mathbf{B}$  ist eine Menge von Knoten mit bekannten Spannungen;

In der Lösungsmethode werden die Indizes in aufsteigender Reihenfolge zuerst der Menge von Knoten  $\mathbf{A}$  und anschließend der Menge von Knoten  $\mathbf{B}$  hinzugefügt. Die Sub-Matrizen  $\mathbf{G}_{AA}$  bzw.  $\mathbf{G}_{AB}$  werden daher in der Knotenadmittanzmatrix wie folgt platziert:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{AA} & \mathbf{G}_{AB} \\ \mathbf{G}_{BA} & \mathbf{G}_{BB} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

Die Sub-Vektoren  $u_A(t)$  bzw.  $u_B(t)$  werden im Vektor  $\mathbf{u}(t)$  wie folgt platziert:

$$\mathbf{u}(t) = [u_A(t) \quad u_B(t)]^T \quad (2-3)$$

Die Sub-Vektoren  $i_A(t)$  bzw.  $i_B(t)$  werden im Vektor  $\mathbf{i}_Q(t)$  wie folgt platziert:

$$\mathbf{i}_Q(t) = [i_A(t) \quad i_B(t)]^T \quad (2-4)$$

---

<sup>4</sup> Die Diskretisierung von dynamischen Elementen wird in Kapitel 2.1.1.1 beschrieben.

Die Sub-Vektoren  $i_{HA}(t)$  bzw.  $i_{HB}(t)$  werden im Vektor  $\mathbf{i}_H(t)$  wie folgt platziert:

$$\mathbf{i}_H(t) = [i_{HA}(t) \quad i_{HB}(t)]^T \quad (2-5)$$

Um die Differentialgleichung zu diskretisieren wird der Vektor  $\mathbf{i}_H(t)$ , basierend auf dem Typ des Elementes und der verwendeten numerischen Integrationsmethode, für die dynamischen linearen passiven Elemente zu jedem Zeitpunkt aktualisiert und die Differentialgleichung zu diskretisieren.

Ausgehend von Gleichung (2-1) ist die Knotenleitwertmatrix  $\mathbf{G}$  und ihre Sub-Matrizen  $\mathbf{G}_{AA}$  und  $\mathbf{G}_{AB}$  im gesamten Simulationsfenster konstant. Ist die Matrix  $\mathbf{G}_{AA}$  konstant, kann ihre Inverse  $\mathbf{G}_{AA}^{-1}$  noch vor Beginn der Simulation berechnet werden und führt zu folgendem Knotengleichungssystem:

$$u_A(t) = \mathbf{G}_{AA}^{-1} \cdot (i_A(t) - i_{HA} - \mathbf{G}_{AB} \cdot u_B(t)) \quad (2-6)$$

Auf diese Weise erfordert die Simulation weniger Berechnungen, im Gegensatz zu Gleichung (2-1), da das Gleichungssystem nicht zu jedem Zeitpunkt ( $t$ ) neu gelöst werden muss und somit schneller ablaufen kann.

Im einfachsten Fall ist die Anfangsbedingung einer transienten Simulation Null, womit auch die Vergangenheitswerte Null sind. Eine transiente Simulation kann als Anfangsbedingung auch den eingeschwungenen Zustand, sprich die stationäre Lösung, enthalten. Die stationäre Lösung berechnet sich im Frequenzbereich bei einer gewissen Frequenz, womit Spannungs- und Stromvektoren komplexen Zeigern entsprechen. Aus Gleichung (2-1) wird für die stationäre Lösung

$$\mathbf{Y}_{AA} \cdot u_A = i_A - \mathbf{Y}_{AB} \cdot u_B \quad (2-7)$$

$\mathbf{Y}$  ist eine symmetrische Knotenadmittanzmatrix aus  $n \times n$  Knoten, beinhaltet komplexe Elemente;

$\mathbf{u}$  ist ein Vektor aus  $n$  Knotenspannungen mit komplexen Zeigerwerten;

$\mathbf{i}$  ist ein Vektor von  $n$  Stromquellen,

$\mathbf{A}$  ist eine Menge von Knoten mit unbekanntem Spannungen;

$\mathbf{B}$  ist eine Menge von Knoten mit bekannten Spannungen;

### 2.1.2 Numerische Integration

Die Strategie, die zur Modellierung eines Netzwerkes verwendet wird, besteht darin, die zeitkontinuierlichen Differentialgleichungen, die das Verhalten des zu simulierenden Systems beschreiben, in diskrete Zeitdifferenzgleichungen mit Lösungen in Zeitintervallen fester Zeitschrittgröße  $\Delta t$  umzuwandeln. Die trapezförmige Integrationsregel wurde aufgrund der Genauigkeit und Stabilität bevorzugt, was zur Einfachheit im Rechencode gegenüber anderen bestehenden Integrationsregeln beiträgt. [1]

Die trapezförmige Integrationsregel hat jedoch die Eigenschaft, künstliche numerische Oszillationen im Zeitbereich der Simulation zu verursachen. Diese numerischen Oszillationen können die korrekte Interpretation der Simulationsantwort beeinträchtigen, wenn die Ursachen und möglichen Lösungen nicht bekannt sind. Diese numerischen Oszillationen werden im Wesentlichen durch zwei Situationen verursacht. Die erste Situation tritt beim Umschalten nichtlinearer Elemente auf. Die zweite Situation ist auf einen Schaltvorgang zurückzuführen, der eine Änderung der Systemtopologie verursacht und sich folglich dadurch der Strom der Induktivität bzw. die Spannung des Kondensators abrupt ändert. Im Fall einer Induktivität liegt die folgende Differentialgleichung zur Erhaltung des digitalen Modells zugrunde. Die Methode ist beschrieben in [8].

$$u(t) = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2-8)$$

$$\int_{t-\Delta t}^t u(\tau) \cdot d\tau = L \cdot \int_{t-\Delta t}^t di(\tau) \quad (2-9)$$

Das erste Integral entspricht der Fläche unter der Kurve  $u(\tau)$  von  $t - \Delta t$  bis  $t$ . Durch Anwendung der Trapezregel erhält man folgende Näherung:

$$\int_{t-\Delta t}^t u(\tau) \cdot d\tau \approx \frac{(u(t - \Delta t) + u(t)) \cdot \Delta t}{2} \quad (2-10)$$

Der in RelaySimTest verwendete Algorithmus nutzt das Knotenadmittanzverfahren (siehe Kapitel 2.1.1) für die Lösungsberechnung, daher ist es notwendig, dieses Induktivitätsmodell umzuwandeln. Man erhält ein zeitdiskretes äquivalentes Modell nach Norton für eine Induktivität.

$$i_L(t) = \frac{\Delta t}{2L} \cdot u_L(t) - hist(t - \Delta t) \quad (2-11)$$

$$hist(t) = \left( i_L(t - \Delta t) - \frac{\Delta t}{2L} \cdot u_L(t - \Delta t) \right) \quad (2-12)$$

Diese Anwendung kann aber zu numerischen Oszillationen führen. Insbesondere schwingen einige Variablen des Netzwerkes um den korrekten Wert, sodass der Durchschnitt an jeweils zwei Punkten die richtige Antwort ist.

Eine Methode zur wirksamen Dämpfung solcher numerischen Oszillationen wäre das CDA - Schema [9]. Diese effektive Methode greift vorübergehend auf eine andere Integrationsmethode zurück.



## 2.1.3 Modaltransformation

### 2.1.3.1 Symmetrische Komponenten

Um die stationäre Lösung zu erhalten, müssen nun, wie im Kapitel 2.1.1 beschrieben, die linearen dynamischen Elemente der Leitung in die Knotenadmittanzmatrix eingefügt werden um die stationäre Lösung zu erhalten. Im Falle einer dreiphasigen Leitung erweitert sich die Knotenadmittanzmatrix, da aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung der Leiter selbst, diese Kopplungen in die Berechnung miteinbezogen werden müssen.

Eine dreiphasige Leitung mit verteilten Parametern (Kapitel 2.2.4.2) kann in ein Mit-, Gegen- und Nullsystem zerlegt werden, wenn die Leitung als symmetrisch angenommen wird. Unter Voraussetzung, dass das Gegensystem gleich dem Mitsystem, ist können die Elemente als symmetrische Komponenten angeführt werden. [1, 10,]

$$[\underline{Y}_{sym}[1, 1]] = \begin{bmatrix} Y_{pos(1,1)} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{pos(1,1)} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{zero(1,1)} \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

Das gilt analog für  $[\underline{Y}_{sym}[1, 2]]$ ,  $[\underline{Y}_{sym}[2, 1]]$  und  $[\underline{Y}_{sym}[2, 2]]$ .<sup>5</sup>

$$[\underline{Y}_{sym}] = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{sym}[1, 1] & \underline{Y}_{sym}[1, 2] \\ \underline{Y}_{sym}[2, 1] & \underline{Y}_{sym}[2, 2] \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

Für weitere Netzberechnungen müssen die symmetrischen Komponenten in physikalische Größen mit Hilfe zweier Transformationsmatrizen umgerechnet werden.

$$\underline{s} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad \underline{s}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

mit  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ .

$$[\underline{Y}_{phy}[1, 1]] = [\underline{s}] \cdot [\underline{Y}_{sym}[1, 1]] \cdot [\underline{s}^{-1}] \quad (2-15)$$

Das gilt analog für  $[\underline{Y}_{phy}[1, 2]]$ ,  $[\underline{Y}_{phy}[2, 1]]$  und  $[\underline{Y}_{phy}[2, 2]]$ .

$$[\underline{Y}_{phy}] = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{phy}[1, 1] & \underline{Y}_{phy}[1, 2] \\ \underline{Y}_{phy}[2, 1] & \underline{Y}_{phy}[2, 2] \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

Für physikalische Größen ist die Nebendiagonale der Matrix nicht mehr Null.

---

<sup>5</sup> Indizes [1,1], [1,2], [2,1] und [2,2] stehen für die Nummerierung der Elemente in der Knotenadmittanzmatrix

$$[\underline{Y}_{phy}[\mathbf{1}, \mathbf{1}]] = \begin{bmatrix} Y_{AA(1,1)} & Y_{AB(1,1)} & Y_{AC(1,1)} \\ Y_{BA(1,1)} & Y_{BB(1,1)} & Y_{BC(1,1)} \\ Y_{CA(1,1)} & Y_{CB(1,1)} & Y_{CC(1,1)} \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

Die Elemente der Hauptdiagonale der Matrix beschreiben die Selbstadmittanz bzw. Selbstimpedanz der vorhandenen Leiterschleifen über Hin- und Rückleiter. In der Nebendiagonale der Matrix befinden sich die Elemente, die für die magnetische bzw. elektrische Kopplung zwischen den einzelnen Leitern verantwortlich sind.

### 2.1.3.2 Diagonalkomponenten

Für die Lösung der Differentialgleichungen im Zeitbereich sind die symmetrischen Komponenten (Kapitel 2.1.3.1) nicht anwendbar, da aus reellen Funktionen und Gleichungen komplexe Funktionen und Gleichungen entstehen. Hier bietet sich die Verwendung von Diagonalkomponenten, besser bekannt als die  $\alpha, \beta, 0$ -Komponenten an. Die Methode ist in [1, 11, 12] beschrieben.

Es sollen nun Transformationsmatrizen gefunden werden um Gleichung ((2-17)) zu diagonalisieren. Dazu müssen aber Eigenvektoren bzw. Eigenwerte gefunden und berechnet werden. Für dieses Problem lassen sich folgende Transformationsmatrizen ableiten, welche für transponierte Mehrphasensysteme gültig sind.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \mathbf{T}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}$$

Mit Hilfe der Transformationsmatrizen können nun die  $\alpha, \beta, 0$ -Komponenten ermittelt und somit entkoppelt betrachtet werden.

$$[\underline{Y}_{\alpha, \beta, 0}[\mathbf{1}, \mathbf{1}]] = [\mathbf{T}^{-1}] \cdot [\underline{Y}_{phy}[\mathbf{1}, \mathbf{1}]] \cdot [\mathbf{T}] \quad (2-18)$$

$$[\underline{Y}_{\alpha, \beta, 0}[\mathbf{1}, \mathbf{1}]] = \begin{bmatrix} Y_{\alpha(1,1)} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\beta(1,1)} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{0(1,1)} \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

Das gilt analog für  $\underline{Y}_{\alpha, \beta, 0}[\mathbf{1}, \mathbf{2}]$ ,  $\underline{Y}_{\alpha, \beta, 0}[\mathbf{2}, \mathbf{1}]$  und  $\underline{Y}_{\alpha, \beta, 0}[\mathbf{2}, \mathbf{2}]$ .

Zu erwähnen ist, dass die Lösung von mehrphasigen Übertragungsleitungen einfacher wird, wenn diese in entkoppelte Gleichungen transformiert werden. Diese entkoppelten Gleichungen können so gelöst werden, als wären sie einphasige Gleichungen. Diese Methode ist essentiell für verteilte Leitungsparameter.

## 2.2 Leitungsmodellierung von Übertragungsleitungen

In der elektrischen Energieversorgung werden für den Transport der elektrischen Energie in allen Spannungsebenen meist Freileitungen eingesetzt. Das Isoliermedium einer Freileitung ist ausschließlich Luft, welches die Investitionskosten niedrig hält und somit einen wesentlichen Vorteil gegenüber anderen Übertragungsmöglichkeiten bietet. Die metallischen Leiter haben die Aufgabe, das magnetische und elektrische Feld und somit die Leistung zu führen (Poyntingscher Vektor  $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ ).

### 2.2.1 Leitungsparameter

Jede elektrische Leitung, basierend auf den Maxwell'schen Feldgleichungen, kann durch ihre Leitungsbeläge ausgedrückt werden. Bei einer Freileitung oder Kabel bestehen diese Leitungsbeläge aus einem Widerstandsbelag, einem Ableitungsbelag, einem Induktivitätsbelag und einem Kapazitätsbelag. Diese Größen beziehen sich immer auf die Länge der jeweiligen Leitung. [10]

Um die physikalischen Effekte nachzubilden kann das Ersatzschaltbild einer elektrischen Leitung somit aus passiven, elektrischen Elementen dargestellt werden. Die Energieübertragung erfolgt nicht im Leiter, sondern durch elektrische und magnetische Felder zwischen den Leitern und in Analogie zu den elektromagnetischen Feldgrößen können Spannung und Strom entlang der Leitung angegeben werden. Eine Voraussetzung für die Leitungstheorie ist, dass der Abstand  $d$  zwischen den Leitern wesentlich kleiner ist als die Wellenlänge  $\lambda$  [13].

$$d \ll \lambda = \frac{v}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2-20)$$

Durch Anlegen einer Spannungsquelle auf einer Leitung wird sich sofort auf dem Leiter ein Strom einstellen. Dieser Stromfluss erzeugt ein magnetisches Feld, aus welchem der differentielle Induktivitätsbelag definiert werden kann.

$$\Phi' dz = i \cdot L' dz \quad (2-21)$$

Durch die auftretende Spannung entsteht eine Oberflächenladung auf der Leitung, aus der der differentielle Kapazitätsbelag definiert werden kann.

$$Q' dz = u \cdot C' dz \quad (2-22)$$

Diese beiden Effekte können über die Feldlinienverteilung des magnetischen Feldes  $H$  und des elektrischen Feldes  $E$  anschaulich dargestellt werden, was in Abbildung 2-1 gezeigt wird.

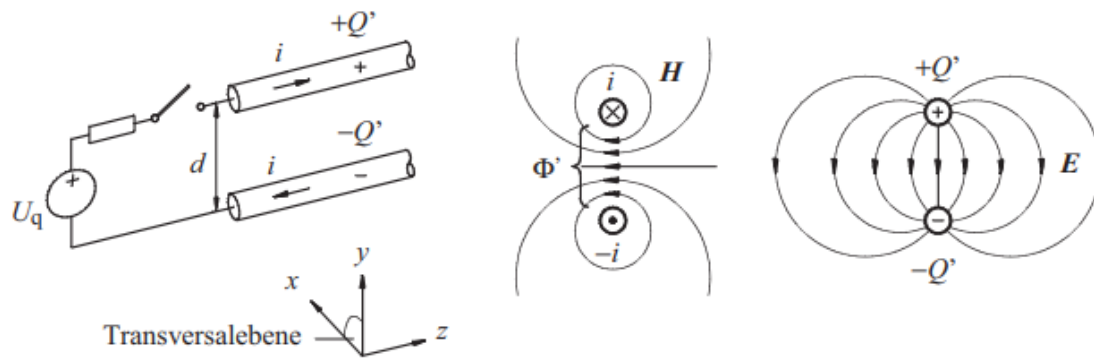


Abbildung 2-1 Feldlinienverteilung einer symmetrischen Zweidrahtleitung in der Transversalebene [13]

In einer realen Leitung mit metallischen Leitern und einem verlustbehafteten Dielektrikum entsteht zusätzlich ein Widerstandsbelag  $R'$  und ein Ableitungsbelag  $G'$ .

Zusammenfassend stellt der Induktivitätsbelag das vom Strom induzierte Magnetfeld dar, welches durch das Aufspannen einer Leiterschleife aufgrund von parallel verlaufenden Leitungsabschnitten zustande kommt. Der Kapazitätsbelag berücksichtigt das elektrische Feld, das sich, wie bei einem Kondensator, im Dielektrikum zwischen zwei Leitungen aufbaut. Der Widerstandsbelag kommt aufgrund der Materialien in den Leitern zustande, welche bei Stromfluss ohmsche Verluste und damit einen Spannungsabfall verursachen. Der Ableitungsbelag stellt einen Leitungsquerschnitt dar und entsteht aufgrund von Koronaverlusten im Dielektrikum und Kriechstromverlusten über die Isolatoren. [10]

## 2.2.2 Allgemeine Leitungsgleichungen

Den allgemeinen Leitungsgleichungen liegen die Telegraphengleichungen [14] zugrunde, welche eine zeitabhängige und örtliche Beschreibung von Spannung und Strom vorweisen können.

### 2.2.2.1 Leitungsgleichungen im Zeitbereich

Ausgehend von Abbildung 2-3 und der Annahme, dass Spannung  $u$  und Strom  $i$  Funktionen des Ortes  $x$  entlang der Leitung und der Zeit ( $t$ ) sind, kann mit Hilfe der Kirchhoffschen Gesetze folgende Gleichung gewonnen werden.

$$\frac{u(x + \Delta x, t) - u(x, t)}{\Delta x} = -R' \cdot i(x, t) - L' \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (2-23)$$

$$\frac{i(x + \Delta x, t) - i(x, t)}{\Delta x} = -G' \cdot \Delta x \cdot u(x + \Delta x, t) - C' \cdot \Delta x \frac{\partial u(x + \Delta x, t)}{\partial t} \quad (2-24)$$

Aus diesen obigen Gesetzmäßigkeiten und der Annahme, dass die Bewegung entlang der Leitung infinitesimal klein ist, können die Telegraphengleichungen abgeleitet werden.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R' \cdot G' \cdot u + (R' \cdot C' + L' \cdot G') \frac{\partial u}{\partial t} + L' \cdot C' \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2-25)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = R' \cdot G' \cdot i + (R' \cdot C' + L' \cdot G') \frac{\partial i}{\partial t} + L' \cdot C' \cdot \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2-26)$$

Diese beiden partiellen Differentialgleichungen (2-25) und (2-26). gelten für beliebige Zeitabhängigkeit von Spannung und Strom, also auch für elektromagnetische Ausgleichsvorgänge. Obwohl die Methode prinzipiell auf verlustbehaftete Leitungen anwendbar ist, sind die gewöhnlichen Differentialgleichungen, die hier erzeugt werden, nicht direkt integrierbar und lösbar. [15]

Daher wird die Frequenzabhängigkeit der Leitungsparameter vernachlässigt und die Leitung als verlustlos angenommen. Mit dieser Annahme führen die Gleichungen im Zeitbereich zur allgemeinen Lösung nach d'Alembert:

$$u(x, t) = Z_w \cdot u_v(x - vt) - Z_w \cdot u_r(x + vt) \quad (2-27)$$

$$i(x, t) = u_v(x - vt) + u_r(x + vt) \quad (2-28)$$

Zur Veranschaulichung des Sachverhaltes bewege sich ein Beobachter mit der Wellenfront. Hierbei bleiben die Argumente  $(x - vt)$  und  $(x + vt)$  sowie ihre Funktionen  $u_v(x - vt)$  und  $u_r(x + vt)$  konstant. Wobei  $u_v(x - vt)$  einer Wanderwelle mit Geschwindigkeit  $v$  in Vorwärtsrichtung und  $u_r(x + vt)$  einer Wanderwelle in Rückwärtsrichtung entspricht. Der Wellenwiderstand bei einer verlustlosen Leitung und die Geschwindigkeit der Wellenausbreitung lassen sich in diesem Fall wie folgt berechnen:

$$Z_w = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (2-29)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} \quad (2-30)$$

Die Darstellung im Zeitbereich erlaubt die Behandlung beliebiger, zeitlich veränderbarer Vorgänge. Die Lösung der Leitungsgleichungen im Zeitbereich stellt die Grundlage der sehr wichtigen Wanderwellentheorie dar. [7, 16]

### 2.2.2.2 Leitungsgleichungen im Frequenzbereich

Eine Beschränkung auf sinusförmige Erregung (Frequenzbereich) erlaubt die komplexe Darstellung der Leitungsgleichungen, wodurch die partiellen Differentialgleichungen in gewöhnliche Differentialgleichungen übergehen. Veränderliche Spannungen  $u(t)$  und  $i(t)$  werden als Zeiger (komplexe Amplituden) dargestellt. Da alle Zeiger den gleichen Faktor haben, fällt aus den Gleichungen (2-25) und (2-26) die sinusförmige Zeitabhängigkeit heraus.

$$\frac{d^2 \underline{U}}{dx^2} = (R' + j\omega L')(G' + j\omega C') \cdot \underline{U} = -\underline{Z}' \cdot \underline{Y}' \cdot \underline{U} \quad (2-31)$$

$$\frac{d^2 \underline{I}}{dx^2} = (R' + j\omega L')(G' + j\omega C') \cdot \underline{I} = -\underline{Y}' \cdot \underline{Z}' \cdot \underline{I} \quad (2-32)$$

wobei  $(R' + j\omega L')(G' + j\omega C') = \gamma^2$

Die Lösung der gewöhnlichen Differentialgleichungen (2-31) und (2-32) erfolgt mit einem Exponentialansatz nach d'Alembert:

$$\underline{U} = \underline{U}_v \cdot e^{-\gamma x} + \underline{U}_r \cdot e^{+\gamma x} \quad (2-33)$$

$$\underline{I} = \underline{I}_v \cdot e^{-\gamma x} - \underline{I}_r \cdot e^{+\gamma x} = \frac{1}{\underline{Z}_w} \cdot (\underline{U}_v \cdot e^{-\gamma x} + \underline{U}_r \cdot e^{+\gamma x}) \quad (2-34)$$

Die Spannungs- und Stromkonstanten der Gleichungen (2-33) und (2-34) werden durch die Randbedingungen an einem Punkt der Leitung berechnet. Dabei entsprechen  $\underline{U}_v e^{-\gamma x}$  und  $\underline{I}_v e^{-\gamma x}$  einer vorlaufenden Welle und  $\underline{U}_r e^{-\gamma x}$  und  $\underline{I}_r e^{+\gamma x}$  einer rücklaufenden Welle. Daraus können die Wellenausbreitungskonstante  $\underline{\gamma}$  und der Wellenwiderstand  $\underline{Z}_w$  berechnet werden:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}' \cdot \underline{Y}'} \quad (2-35)$$

$$\underline{Z}_w = \sqrt{\frac{\underline{Z}'}{\underline{Y}'}} \quad (2-36)$$

Ein Leitersystem kann somit aus den Gleichungen (2-33) und (2-34) beschrieben werden. Die Darstellung im Frequenzbereich beschreibt harmonische, das heißt sinusförmig eingeschwungene Zustände einer diskreten Frequenz. [10, 16, 17]

### 2.2.3 Stationäre Lösung

Die stationäre Lösung beschreibt den eingeschwungenen Zustand eines Netzwerkes und wird bei einer diskreten Frequenz, im elektrischen Energiesystem üblicherweise bei 50 Hz, berechnet. Zur Beschreibung dienen die Leitungsgleichungen im Frequenzbereich (Kapitel 2.2.2.2). Die stationäre Lösung für eine Leitung kann mit Hilfe von konzentrierten oder verteilten Leitungsparametern ermittelt werden.

#### 2.2.3.1 Leitungsmodell mit konzentrierten Parametern

Die Modellbildung dieser Methode bewirkt, dass die Leitungsparameter (Kapitel 2.2.1) als konzentrierte Elemente dargestellt werden können. Die Leitungslänge wird mit dem entsprechenden Leitungsparametern multipliziert und in ein Ersatzschaltbild überführt. Die Leitung ist bei dieser Methode elektrisch kurz<sup>6</sup> und lediglich für niederfrequente Vorgänge hinreichend genau. Durch Hintereinanderschalten mehrerer konzentrierter Ersatzschaltbilder kann die Frequenzgrenze nach oben

---

<sup>6</sup> Als elektrisch kurz bezeichnet man eine Leitung, deren Länge klein zu Wellenlänge ist. Typisch ist dies Freileitungen kleiner 100km bei 50 Hz Netzfrequenz.

verschoben werden. Abbildung 2-2 zeigt beispielhaft dieses Ersatzschaltbild, welches dem griechischen Buchstaben  $\Pi$  ähnlich sieht. [17]

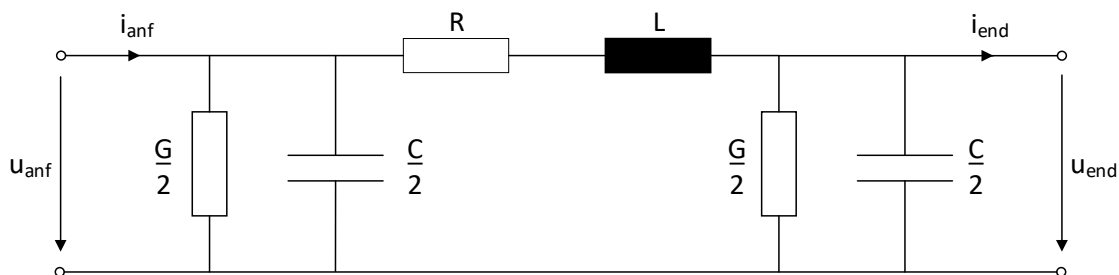


Abbildung 2-2 Einphasiges Ersatzschaltbild mit konzentrierten Parametern

Unter der Bedingung  $|\underline{\gamma}l| \ll 1$  [18] kann eine Vereinfachung angenommen werden. Die konzentrierte Elemente berechnen sich wie folgt, wobei  $\underline{Z}$  die Impedanz der Leitung und  $\underline{Y}$  die Admittanz der Leitung darstellt.

$$\underline{Z} = \underline{Z}' \cdot l = (R' + j\omega L') \cdot l \quad (2-37)$$

$$\frac{\underline{Y}}{2} = \frac{\underline{Y}'}{2} \cdot l = \frac{(G' + j\omega C)}{2} \cdot l \quad (2-38)$$

Entscheidend für die Modellierung einer Leitung ist, wie gut  $|\underline{\gamma}l| \ll 1$  erfüllt ist. Umso größer dieses Produkt wird, desto weniger genau wird das Modell mit den konzentrierten Elementen die Verhältnisse der Wellengleichung wiedergeben. Die Anzahl einzelner  $\Pi$ -Segmente ist einerseits von der Leitungslänge abhängig, andererseits von der Art der Simulation.

### 2.2.3.2 Leitungsmodell mit verteilten Parametern

Bei der Entwicklung eines verteilten Leitungsmodells weisen die Leitungsparameter außer einer zeitlichen Abhängigkeit der Größen zusätzlich noch eine örtliche Abhängigkeit auf. Für eine Modellbildung elektrisch langer<sup>7</sup> Leitungen muss dies berücksichtigt werden. Daher ist ein differentieller Übergang von einem Leitungselement auf die gesamte Länge der Leitung erforderlich. Durch die Linearität der Maxwell'schen Gleichungen [14] können für ein verteiltes Leitungsmodell die Leitungsgleichungen angewendet werden.

<sup>7</sup> Elektrisch lang bezeichnet man 50 Hz Freileitungen über 100 km. Ab hier ist es notwendig, die Ortsabhängigkeit von Spannung und Strom zu berücksichtigen.

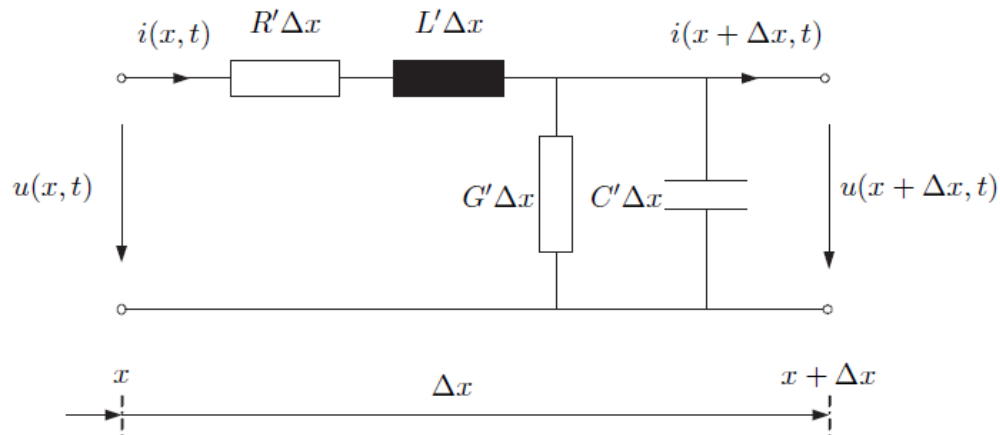


Abbildung 2-3 Einphasiges Ersatzschaltbild eines Längenelementes  $\Delta x$  mit verteilten Parametern

Für eine elektrisch lange Leitung müssen die Leitungsparameter exakt berechnet werden und sie können durch ein äquivalentes  $\Pi$  – Element dargestellt werden. Die Gleichungen (2-37) und (2-38) erweitern sich zu den Gleichungen (2-39) und (2-40).

$$\underline{Z} = l \cdot (R' + j\omega L') \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma \cdot l} \quad (2-39)$$

$$\frac{Y}{2} = \frac{l}{2} (G' + j\omega C') \frac{\tan\left(\frac{\gamma \cdot l}{2}\right)}{\frac{\gamma \cdot l}{2}} \quad (2-40)$$

Für den Fall der verlustlosen Leitung, wobei  $R' = 0$  und  $G' = 0$  sind, vereinfachen sich die Gleichungen (2-39) und (2-40) wie folgt:

$$\underline{Z} = l \cdot j\omega L' \frac{\sin(\omega l \sqrt{L' \cdot C'})}{\omega l \sqrt{L' \cdot C'}} \quad (2-41)$$

$$\frac{Y}{2} = \frac{l}{2} \cdot j\omega C' \frac{\tan\left(\frac{\omega l}{2} \sqrt{L' \cdot C'}\right)}{\frac{\omega \cdot l}{2} \sqrt{L' \cdot C'}} \quad (2-42)$$

## 2.2.4 Transiente Lösung

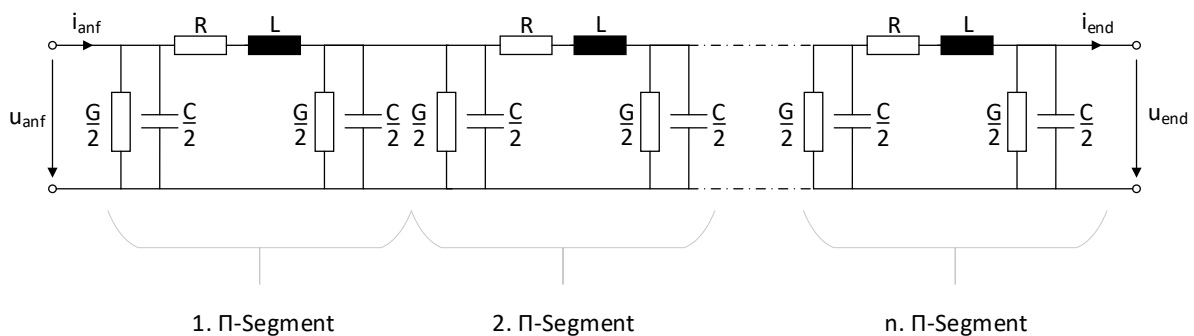
Die transiente Lösung eines Netzwerkes ist eine Ausführung entlang der Zeitachse mit einem gewissen Zeitschritt  $\Delta t$ . Es wird mit einer Anfangsbedingung  $t = 0$  gestartet und für jeden weiteren Zeitschritt  $t = \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t$ ; usw. die transiente Lösung berechnet bis die maximale Zeit bzw. das Ende des Simulationsfensters erreicht ist. Für die Lösung im Zeitschritt  $t$  müssen vorhergehende Vergangenheitswerte  $t - \Delta t, t - 2\Delta t, t - 3\Delta t$ , usw. gespeichert werden. Im Falle eines Leitungsmodells mit verteilten Parametern müssen abhängig von der Laufzeit der Wandewelle dementsprechend viele Werte gespeichert werden für ein Leitungsmodell mit konzentrierten Parametern hingegen nur ein



vorheriger Schritt. Durch Lösen der Leitungsgleichungen kann die transiente Lösung ermittelt werden. [7, 19, 20]

### 2.2.4.1 Leitungsmodell mit konzentrierten Parametern

Wird für die stationäre Lösung ein konzentriertes Leitungsmodell verwendet, baut auch die transiente Lösung auf ein konzentriertes Leitungsmodell auf. Für die transiente Lösung wird ein größerer Frequenzbereich untersucht, weshalb es notwendig ist, mehrere  $\Pi$ -Segmente bzw. elektrisch kurze Leitungen hintereinander zu schalten. *Abbildung 2-4* soll ein solches transientes Leitungsmodell veranschaulichen. Die maximale Frequenz, die betrachtet werden möchte, gibt die Anzahl der  $\Pi$ -Segmente für eine bestimmte Leitungslänge vor.



*Abbildung 2-4 Einphasiges Ersatzschaltbild mit hintereinander geschalteten  $\Pi$  Segmenten*

Im Allgemeinen ist zu sagen, dass dieses Leitungsmodell nicht die optimale Wahl für transiente Lösung ist, da man durch die Verwendung von mehreren  $\Pi$ -Segmenten in Verbindung mit konzentrierten Parametern nur zu einer hinreichenden Genauigkeit kommt. Außerdem kann es zu in der Realität nicht existierenden Oszillationen kommen, was zu einer Verfälschung der Signale führt.

Einen besseren Ansatz findet hingegen das Leitungsmodell mit verteilten Parametern, welches im folgenden Kapitel erläutert wird.

### 2.2.4.2 Leitungsmodell mit verteilten Parametern

In *Abbildung 2-5* ist ein äquivalentes Leitungsmodell für die Berechnung der transienten Lösung eines verteilten Leitungsmodells dargestellt, welches eine einphasige Leitung vollständig beschreibt. Topologisch sind Terminal k und Terminal m nicht miteinander verbunden. Die Bedingung am anderen Ende der Leitung erfolgt indirekt um eine Zeitverspätung  $\tau^8$  durch die äquivalente Stromquelle  $I_k(t - \tau)$  bzw.  $I_m(t - \tau)$ .

<sup>8</sup> Beschreibt im Allgemeinen die Laufzeit bzw. die benötigte Zeit der Wanderwelle, bis der Leitungsanfang bzw. das Leitungsende erreicht wird.

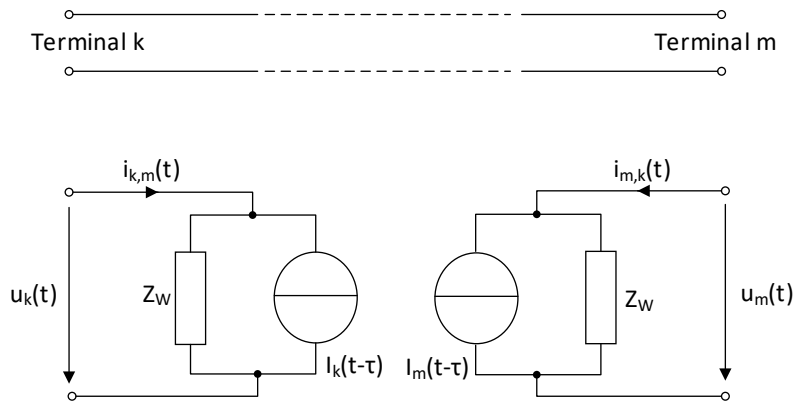


Abbildung 2-5 Äquivalentes Impedanznetzwerk einer verlustlosen verteilten Leitung

Durch Überlegung, dass sich ein Beobachter mit der Wellenfront mitbewegt und somit für den Beobachter die Wellenfront konstant bleibt und der Beziehung  $\tau = l\sqrt{L'C'}$  können folgende Gleichungen für das transiente Leitungsmodell abgeleitet werden.

Terminal k:

$$i_{k,m}(t) = \frac{1}{Z_W} \cdot u_k(t) + I_k(t - \tau) \quad (2-43)$$

$$I_k(t - \tau) = -\frac{1}{Z_W} \cdot u_m(t - \tau) - i_{m,k}(t - \tau) \quad (2-44)$$

Terminal m:

$$i_{m,k}(t) = \frac{1}{Z_W} \cdot u_m(t) + I_m(t - \tau) \quad (2-45)$$

$$I_m(t - \tau) = -\frac{1}{Z_W} \cdot u_k(t - \tau) - i_{k,m}(t - \tau) \quad (2-46)$$

Die obigen Gleichungen gelten im Fall der verlustlosen Leitung und stellen die Basis für ein verteiltes Leitungsmodell dar. Für eine verlustbehaftete Leitung muss ein anderes Modell gewählt werden. Dabei verursacht die Nachbildung des homogen verteilten Widerstandsbelages  $R'$  Schwierigkeiten. In Kapitel 4 wird detailliert auf Modelle mit verlustbehafteter Leitung eingegangen.

Für ein Leitungsmodell mit verteilten Parametern und um die Ortsabhängigkeit der Leitungsparameter zu garantieren, müssen berechnete Werte in einem angelegten Speicher hinterlegt werden. Dies geschieht im sogenannten Queue (Englisch für Warteschlange), wo im Folgenden darauf eingegangen wird.

### i. Initialisierung der Queue

Bevor eine transienten Simulation mit einem Leitungsmodell beschrieben wird, muss eine Initialisierung erfolgen. Es müssen Werte aus vorherigen Zeitpunkten in einem Speicher, im Weiteren Queue genannt, hinterlegt werden. Im einfachsten Fall ist die Initialisierung Null. Ist die Anfangsbedingung die stationäre Lösung, müssen je nach Abtastrate und Laufzeit der Wanderwelle Vergangenheitswerte hinterlegt werden. [1]

Die Laufzeit der Wanderwelle nach einem Ereignis, wie zum Beispiel ein einpoliger Kurzschluss, muss in der Berechnung berücksichtigt werden. In der Queue müssen also Werte aus vorherigen Zeitpunkten gespeichert werden, die mindestens die Zeitlänge von der Laufzeit beinhalten. Folgende Abbildung soll dies verdeutlichen.

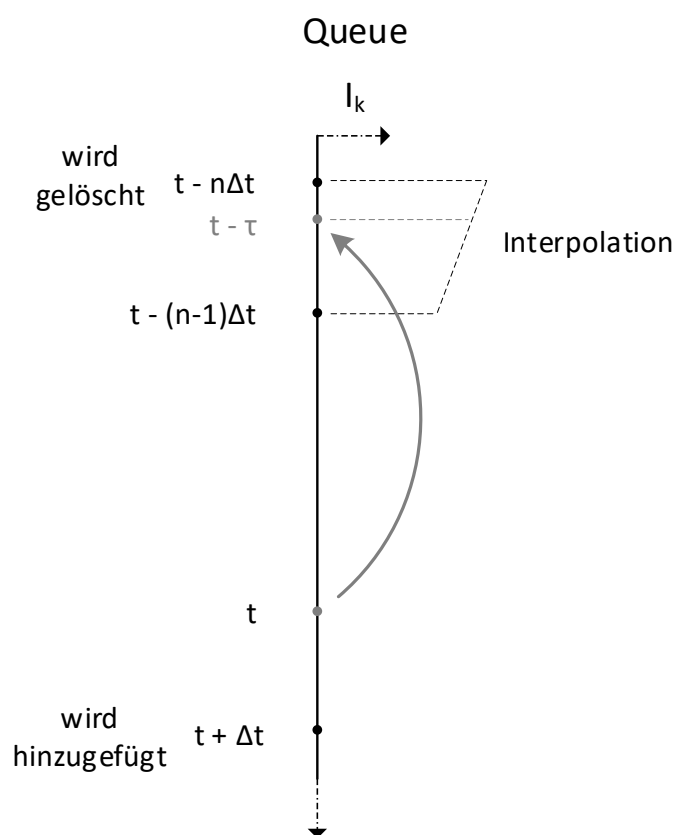


Abbildung 2-6 Berechnung des Wertes der Laufzeit im Queue

Ausgehend von Gleichung (2-43) und (2-45) werden nach Initialisierung der Anfangsbedingung folgende Schritte zur Berechnung des Zeitschrittes  $t$  durchgeführt:

- Ermittlung der Laufzeit  $\tau$
- Speicherung von  $n$  Werten mit  $\Delta t > \tau$  in der Queue.
- Aufrundung, wenn  $\tau$  kein ganzzahliges Vielfaches von  $\Delta t$  ist.
- Interpolation zwischen  $t - n\Delta t$  und  $t - (n-1)\Delta t$  zur Ermittlung des gesuchten Wertes  $t - \tau$
- Aktualisierung des Queue und somit Löschung des ältesten Wertes  $t - n\Delta t$

- Berechnung des nächsten Zeitschrittes  $t + \Delta t$

Dies wird so lange durchgeführt, bis das Ende der Simulation erreicht wird.

## **3 Bestehende Modellierung in Relay Sim Test mit konzentrierten Elementen**

Im verwendeten Netzmodell werden drei mathematische Berechnungsverfahren umgesetzt. Das Knotenadmittanzverfahren 2.1.1 und die beiden numerischen Integrationsverfahren „Implizite-Euler-Methode“ und „Trapez-Methode“. Dabei werden zunächst stationäre Werte mithilfe des Knotenadmittanzverfahrens ermittelt. Diese dienen wiederum als Startwerte für die numerische Integration. Mithilfe der numerischen Integration können transiente Ereignisse berechnet werden. Als Ergebnis erhält man den zeitlichen Verlauf eines Signals.

### **3.1 Implementierung der numerischen Lösungsmethode**

Abbildung 3-1 soll den Ablauf der transienten Simulation im aktuellen Leitungsmodell verdeutlichen.

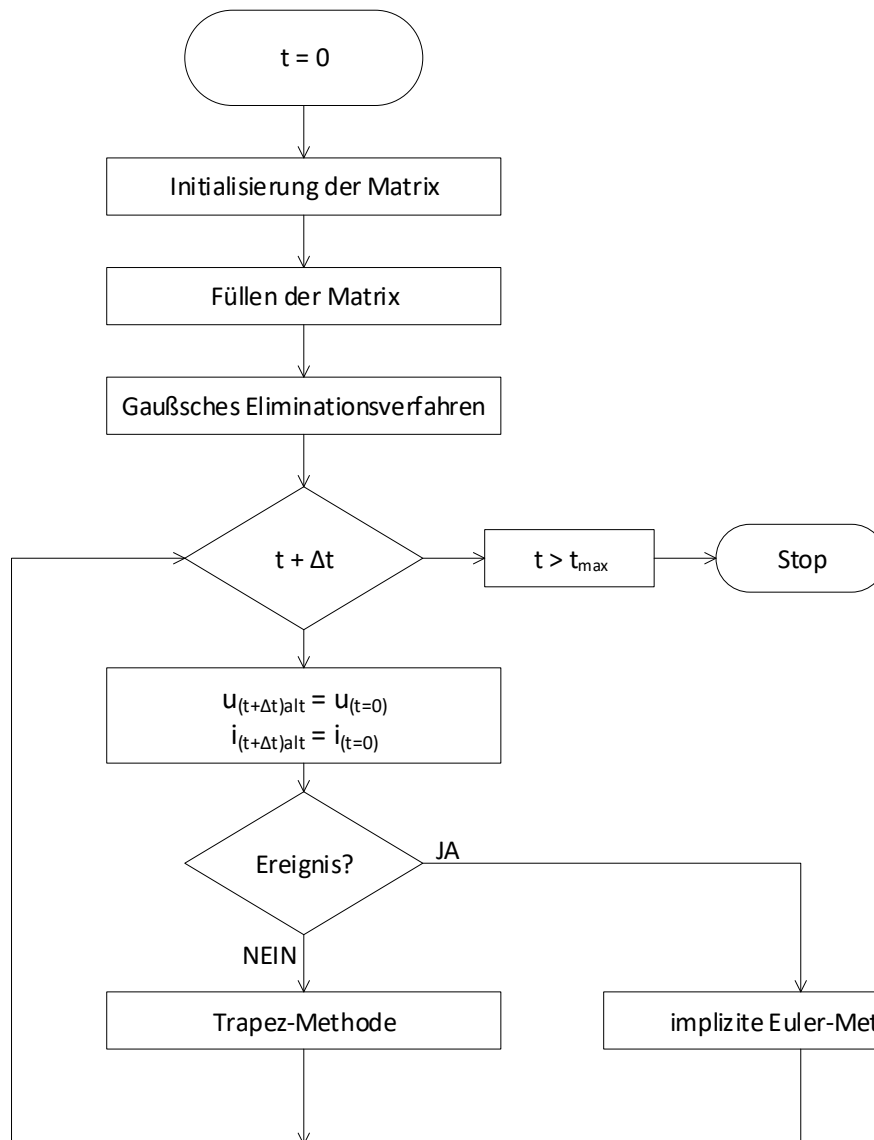


Abbildung 3-1 Ablauf der transienten Simulation im aktuellen Leitungsmodell

Vor der Simulation zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird anhand der Topologie des Netzmodells die benötigte Matrix erstellt. Entsprechend den Anfangsbedingungen wird die Matrix aufgefüllt und um das Gleichungssystem zu lösen mit dem Gaußschen Eliminationsverfahren in eine Dreiecksform gebracht.

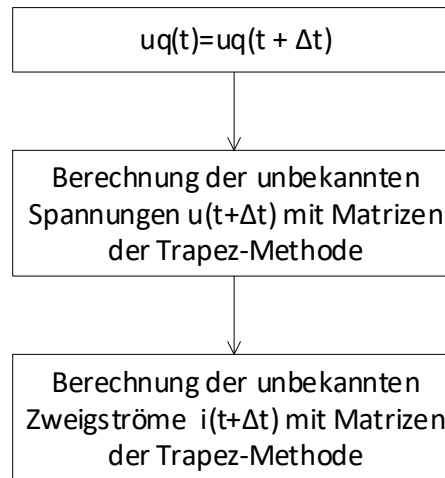
Ist die transiente Simulation gestartet, wird der nächste Zeitschritt  $t + \Delta t$  berechnet, wobei die Werte des erstellten Gleichungssystems zum Zeitpunkt  $t = 0$  gespeichert und als Anfangsbedingungen genutzt werden. Kommt es zu einem Ereignis bzw. es passiert eine Änderung im Netzwerk wird eine Entscheidung getroffen.

Es muss daher eine andere numerische Integrationsmethode verwendet werden, weil die Trapez-Methode zu numerischen Problemen führen würde. Die implizite Euler-Methode wird im Kapitel 3.2 näher erläutert.

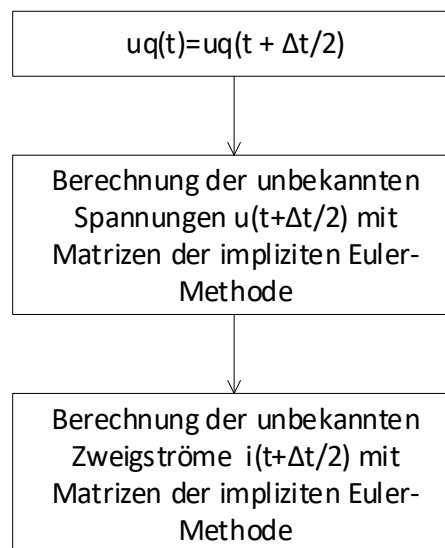
Mit Hilfe der numerischen Integration werden nun die unbekannt Knotenspannungen und im Folge darauf die unbekannt Zweigströme berechnet. Der oben beschriebene Prozess wird solange

ausgeführt, bis die Berechnungen für alle Zeitschritte der Simulation  $\Delta t$  im definierten Simualtionszeitfenster durchgeführt sind.

**Trapez-Methode:**



*Abbildung 3-2 Trapez-Methode mit Zeitschrittlänge  $\Delta t$*

**Implizite Euler-Methode:**Abbildung 3-3 Implizite Euler-Methode mit Zeitschrittlänge  $\Delta t/2$ **3.2 Implizite-Euler-Methode**

Bei Verwendung des traditionellen Trapez-Verfahrens (Kapitel 2.1.2) für die Lösung einer Differentialgleichung im Zeitbereich, kann es bei einer plötzlichen Zustandsänderung im Spannungs- bzw. Stromverlauf zur Entstehung numerischer Probleme führen. Diese numerischen Probleme können sich als unerwünschte Oszillationen ausprägen und in Folge die Verläufe verfälschen. Eine Abhilfe dagegen ist die implizite Euler-Methode.

Nach dem Faradayschen Induktionsgesetz kann eine Spannung über einer Induktivität folgendermaßen ausgedrückt werden. Die Methode ist in [8] beschrieben.

$$u(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt} \quad (3-1)$$

In RelaySimTest wird die Diskretisierung von Differentialgleichungen mit der "gedämpften Trapezregel" der numerischen Integration durchgeführt. Die Anwendung der „gedämpften Trapezregel“ der numerischen Integration auf die Gleichung (oben) führt zu:

$$i(t) = i(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{L} (u(t) + \beta \cdot u(t - \Delta t)) \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (3-2)$$

Dabei sind  $\alpha$  und  $\beta$  Koeffizienten, die durch folgende Einschränkung begrenzt sind:

$$\begin{cases} 0 \leq \beta \leq 1 \\ \alpha = \beta + 1 \end{cases} \quad (3-3)$$

Im extremen Fall, durch die Wahl  $\beta = 0$ , führt dies zur impliziten Euler-Methode:

$$i(t) = i(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{L} u(t) \quad (3-4)$$



Für  $\beta = 1$  ergibt sich wiederum die Trapez-Methode für die numerische Integration.

$$i(t) = i(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{L}(v(t) + v(t - \Delta t)) \cdot \frac{1}{2} \quad (3-5)$$

Das implizite Euler-Verfahren ist ungenauer als das Trapez-Verfahren. Das Trapez-Verfahren kann nach Zustandsänderungen nicht beim ersten Schritt angewendet werden, da es voraussetzt, dass die Ableitung der berechneten Funktion stetig ist. Das implizite Euler-Verfahren hingegen ist numerisch stabiler, es neigt daher zu weniger Oszillationen.

Deswegen ist es sinnvoll, beide Verfahren anzuwenden. Sobald numerische Probleme mit dem traditionellen Trapez-Verfahren auftreten, kann das implizite Euler-Verfahren angesetzt werden.

### 3.3 Aktuelles Leitungsmodell in RelaySimTest

Das aktuell implementierte Leitungsmodell von RelaySimTest verwendet ein Leitungsmodell mit konzentrierten Parametern 2.2.4.1. In RelaySimTest werden keine  $\Gamma$  - Segmente sondern  $\Gamma$ -Segmente verwendet. Es wird auf ein Element aus konzentrierten Widerstand R und konzentrierter Induktivität L (RL-Element), ein Element aus konzentrierter Kapazität C und konzentrierten Leitwert G (GC-Element) hinzugefügt. Es ändert sich nichts zu einem herkömmlichen  $\Gamma$  - Segment, die Berechnung der Leitungsparameter bleibt gleich, wie in Abbildung 3-4 ersichtlich.

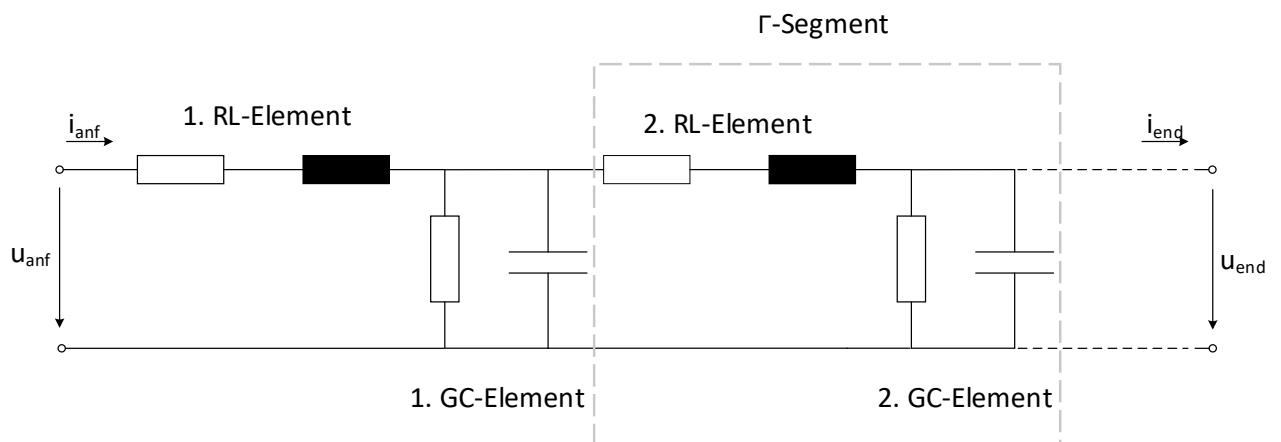


Abbildung 3-4 Aktuelles Leitungsmodell mit konzentrierten Parametern

Wie in Kapitel 162.2.4.1 beschrieben erhöht sich bei transienten Ausgleichsvorgängen die Anzahl der einzelnen Segmente, um eine höhere Genauigkeit erzielen zu können, da nun ein höherer zu untersuchender Frequenzbereich vorliegt. Nach Gleichung aus [21] ergibt sich für die Frequenz eines  $\Gamma$  - Segments und der Länge der Leitung folgender Zusammenhang:

$$f_{\Gamma} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \sqrt{\frac{L' \cdot C'}{2}}} \quad (3-6)$$

Die maximale Abtastrate ist in Relay Sim Test auf 10 kHz beschränkt. Daraus lässt sich nun die maximale Länge eines  $\Gamma$ -Segments berechnen:

$$l_{max} = \frac{1}{5 \cdot f_{\Gamma,max}} \cdot \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} = \frac{1}{5 \cdot 10000} \cdot \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} \quad (3-7)$$

Die Anzahl der  $\Gamma$ -Segmente führt aber zu einem höheren Berechnungsaufwand, weshalb eine Grenze festgelegt werden sollte. In RelaySimTest ist die Anzahl der RL-Elemente bzw. GC-Elemente auf 20 beschränkt. Mit dieser Begrenzung kommt es aber nur zu hinreichender Übereinstimmung bei kürzeren Leitungslängen. Bei einer langen Leitung kann dieses Modell die Realität nicht mehr genau abbilden.

### 3.4 Simulation

Das aktuell implementierte Leitungsmodell soll nun mit Hilfe von zwei weiteren Programmen verglichen werden. Bei den hierbei verwendeten Programmen handelt sich um Matlab/Simulink (kostenbasiert) und EMTP-ATP Draw (lizenzfrei). Beide können zur Berechnung elektromagnetischer Ausgleichsvorgänge in elektrischen Energiesystemen herangezogen werden.

Das Leitungsmodell wird für jedes Programm mit 17  $\Gamma$ -Segmente und einer fixen Schrittweite simuliert, um so auf einen Vergleich und Richtigkeit des Modells schließen zu können. Bei Eintritt eines transienten Vorganges wird für einen Schritt die Schrittweite halbiert um numerische Probleme zu vermeiden. Folgende Tabelle zeigt die Eingangsparameter der durchgeführten Simulation der einzelnen Programme.

Eingangsparameter der durchgeführten Simulation								
Nennspannung	Abtastrate	Leitungslänge	R1	R0	X1	X0	C1	C0
[kV]	[kHz]	[km]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[ $\mu$ F]	[ $\mu$ F]
110	10	100	13,681	41,042	37,588	112,76	1,32	0,41

#### 3.4.1 Repräsentative Beispiele

Zur Veranschaulichung und Überprüfung auf Richtigkeit des aktuellen Leitungsmodells sollen zwei repräsentative Beispiele simuliert werden:

- Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung
- Einpoliger Kurzschluss am Ende einer Leitung

Diese zwei Beispiele wurden gewählt, da sie im Netzbetrieb sehr häufig vorkommen. Für alle drei Softwares wurden dieselben Eingangsparameter angenommen und versucht so exakt wie möglich die Topologie von RelaySimTest wiederzugeben.

### 3.4.1.1 Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung

Zur Erregung der dreiphasigen Leitung in einem starr geerdeten Netz wird eine symmetrische dreiphasige Spannungsquelle verwendet. Die Spannungsquelle wird am Leitungsanfang angeschlossen und auf eine Nennspannung von 110kV eingestellt. Die Leitungslänge beträgt 100km, was einer Simulation von 17  $\Gamma$ -Segmenten entspricht.

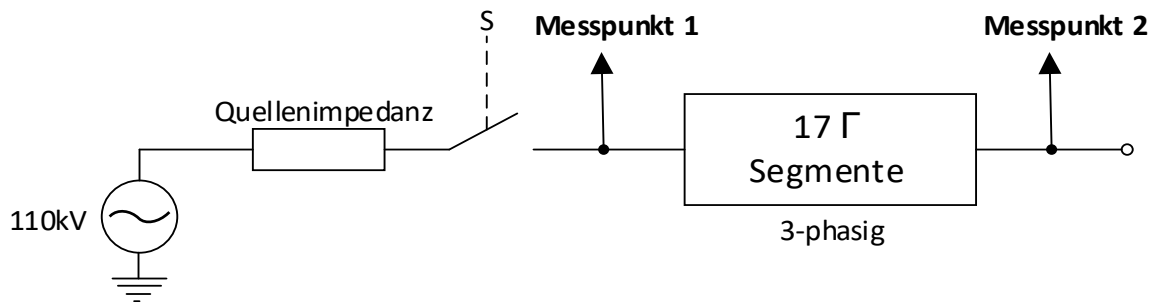


Abbildung 3-5 Schaltungsaufbau – Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung

Die Zuschaltung der dreiphasigen Leitung erfolgt mit Hilfe eines Schalters S zum Zeitpunkt  $t = 100\text{ms}$ . Die Messpunkte befinden sich am Anfang, wo die Strommessung erfolgt und am offenen Ende der Leitung, wo die Spannung gemessen wird.

Bei der Zuschaltung einer Leitung entstehen transiente Vorgänge. Zur besseren Veranschaulichung soll jeweils immer nur eine Phase dargestellt werden. Die Simulation zeigt die Phase 1 der Spannungsmessung am offenen Ende der Leitung. Die Ergebnisse stimmen beim Erreichen des stationären Zustandes überein, jedoch können im transienten Bereich Unterschiede erkannt werden.

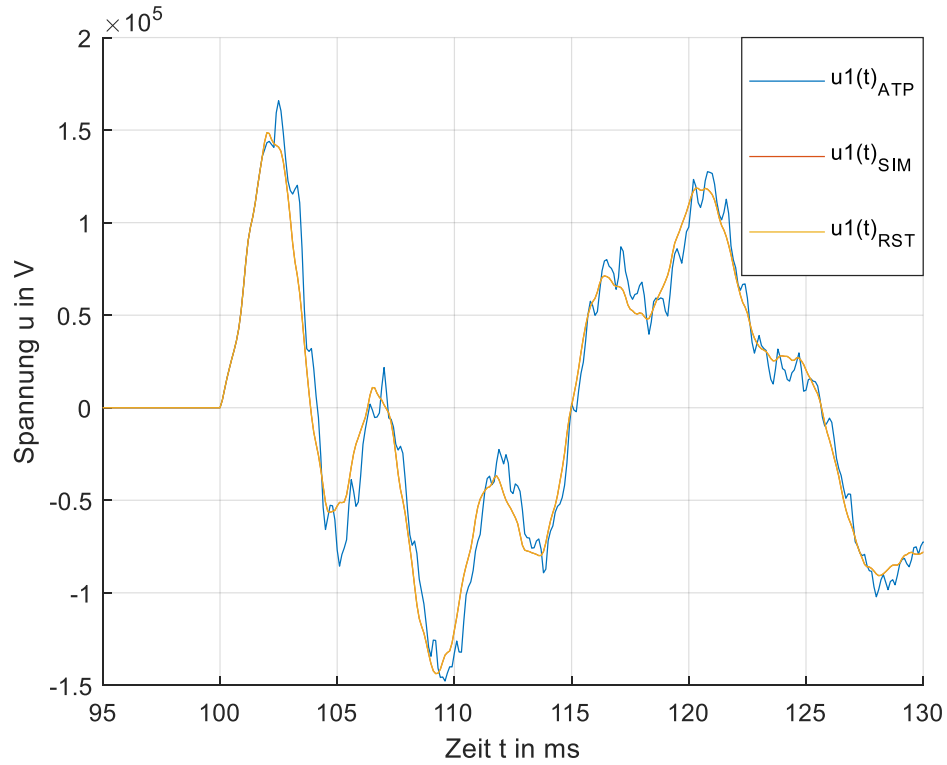


Abbildung 3-6 Spannung bei Messpunkt 2 – gezoomte Darstellung der Phase 1

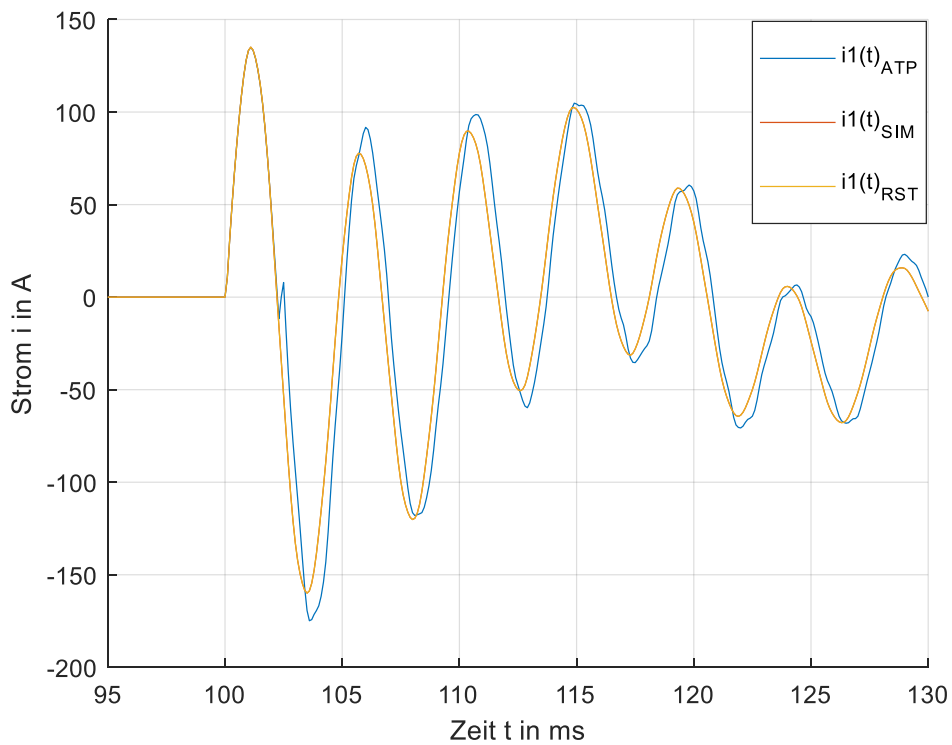


Abbildung 3-7 Strom bei Messpunkt 1 - gezoomte Darstellung der Phase 1

Abbildung 3-6 zeigt eine gezoomte Darstellung der Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung. Im transienten Bereich erkennt man, dass das Simulationsprogramm EMTP-ATP Draw nach wenigen Millisekunden von den beiden Softwares Relay Sim Test und Matlab Simulink abweicht.

Nach etwa drei Millisekunden nach Zuschaltung kommt es bei EMTP-ATP Draw zu unerklärlichen hochfrequenten Oszillationen. Auch das Einschwingverhalten dauert ungewöhnlich lange.

Um diese unerwünschten Effekte zu erklären wurde versucht Parameter zu variieren, die numerische Integrationsmethode zu ändern und mit den Entwicklern von EMTP-ATP Draw Kontakt aufzunehmen. Allerdings blieben alle versuchten Vorhaben erfolglos und somit konnte die Unstimmigkeit nicht eruiert werden.

Auch in Abbildung 3-7, wo der Stromverlauf einer Phase im transienten Bereich dargestellt ist, ergibt sich ein ähnliches Bild. Nach der gleich langen Simulationszeit von 103 Millisekunden kommt es zu einem unerklärlichen Ausreißer, welcher den ganzen weiteren Signalverlauf beeinflusst und verfälscht. Das entspricht nicht dem wirklichen Signalverlauf.

### 3.4.1.2 Einpoliger Kurzschluss am Ende der Leitung

Kurzschlüsse sind einer der häufigsten Fehler in elektrischen Energiesystemen. Je nach Zeitpunkt des Fehlereintrittes kommt es zu unterschiedlichen elektromagnetischen Ausgleichsvorgängen, welche hohe Spannungs- bzw. Stromspitzen erzeugen und es in Folge dessen zu erhöhten Isolationsbeanspruchungen kommen kann.

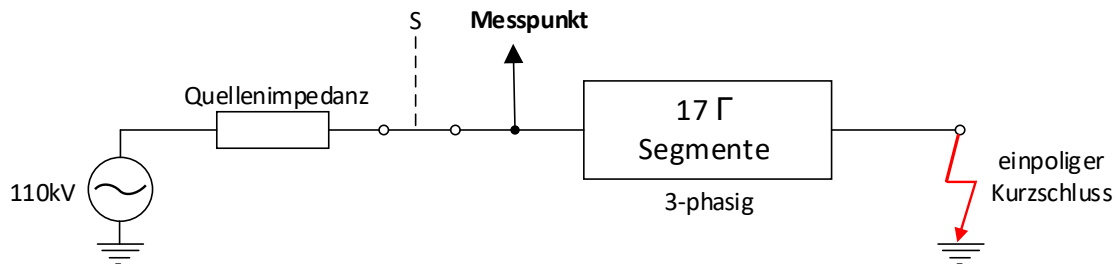


Abbildung 3-8 Schaltungsaufbau – einpoliger Kurzschluss am Ende der Leitung

Die Erregung erfolgt durch eine dreiphasige Spannungsquelle mit einer Nennspannung von 110kV und in einem starr geerdeten Netz. Die Leitungslänge beträgt 100km, was einer Simulation von 17  $\Gamma$ -Segmenten entspricht. Der Schalter S ist geschlossen und bei 100ms kommt es zu einem Fehlereintritt durch einen einpoligen Kurzschluss. Die Messpunkte von Strom und Spannung befinden sich am Anfang der Leitung. Um einen besseren Vergleich zu erzielen wurde der Fehler beim Nulldurchgang der Spannung gewählt, da es bei einem einpoligen Kurzschluss zu sehr starken Transienten kommt. Hier ist nur der Vergleich der unterschiedlichen Softwares relevant.

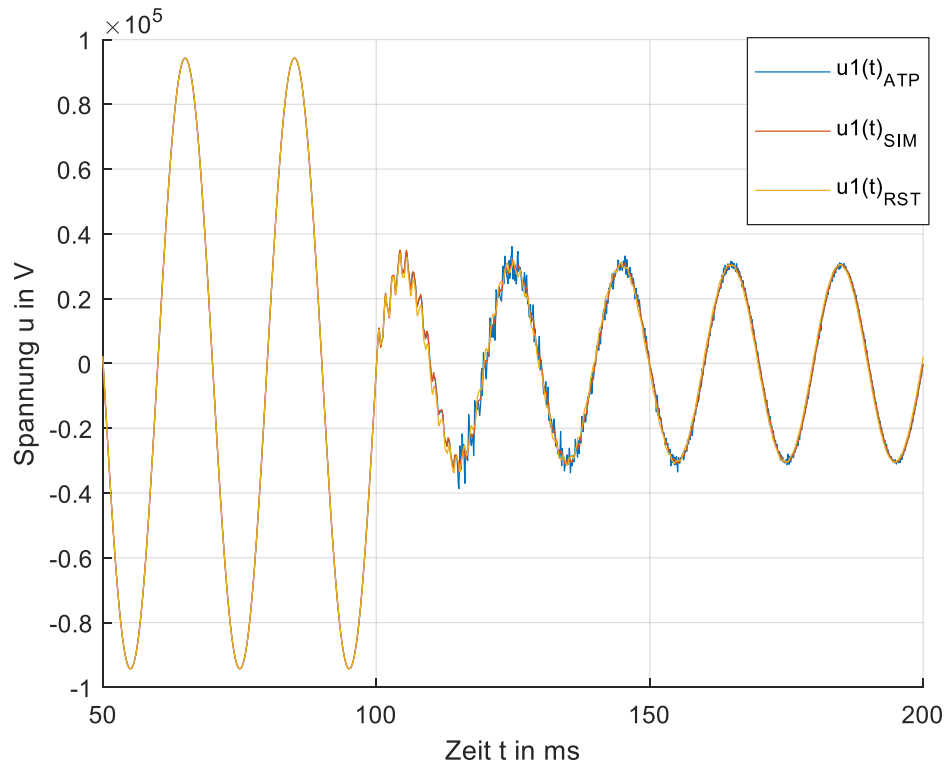


Abbildung 3-9 Spannung bei Messpunkt – fehlerbehaftete Phase 1

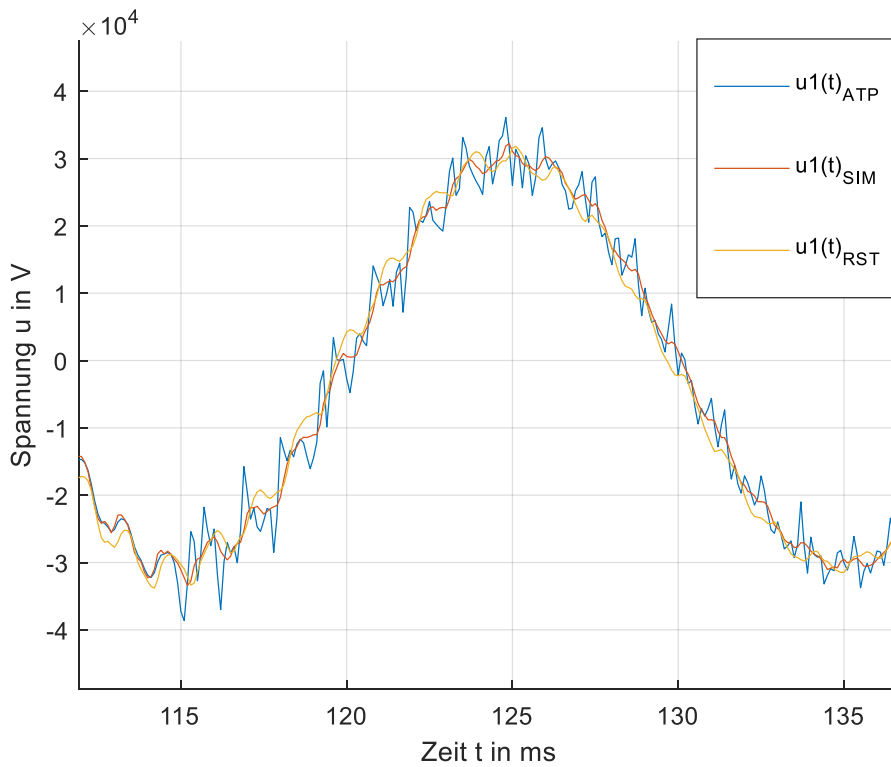


Abbildung 3-10 Spannung bei Messpunkt - gezoomte Darstellung der fehlerbehafteten Phase 1

Abbildung 3-9 zeigt den stationären und transienten Signalverlauf der fehlerbehafteten Phase 1. Die eingeschwingene Lösung des Signals stimmt überein.

Aber auch hier ist zu erkennen, dass nach wenigen Millisekunden nach dem Ereignis es zu Abweichungen im transienten Bereich kommt, wie in Abbildung 3-10 ersichtlich. Bei der Software EMTP-ATP Draw kommt es wieder zu diesen unerklärlichen hochfrequenten Oszillationen.

Es wurden weiters die Eingangsparameter variiert wie auch der Fehlerort bzw. die Fehlerart. Matlab/Simulink überzeugt durch sehr gute Übereinstimmungen in allen durchgeführten Simulationen. Es ist davon auszugehen, dass die lizenzfreie Software EMTP-ATP Draw möglicherweise nicht bei allen Simulationen korrekt arbeitet. Daher wird für die weitere Betrachtung von der Software EMTP-ATP Draw abgesehen und diese als Referenz nicht mehr berücksichtigt.

### 3.4.2 Einfluss der Anzahl der $\Gamma$ - Segmente

Um eine höhere Genauigkeit bzw. realitätsnähere Nachbildung eines Leitungsmodells auch im transienten Bereich zu erhalten, können mehrere  $\Gamma$  - Segmente hintereinandergeschaltet werden. Diese Methode beinhaltet noch einen weiteren physikalischen Effekt, welche auf die Ent- bzw. Beladung der Leitungsparameter zurückzuführen ist. Kapazität und Induktivität der Leitung benötigen eine endliche Zeit für die Energieumladung und somit kommt es zu einer Zeitverzögerung des Signals.

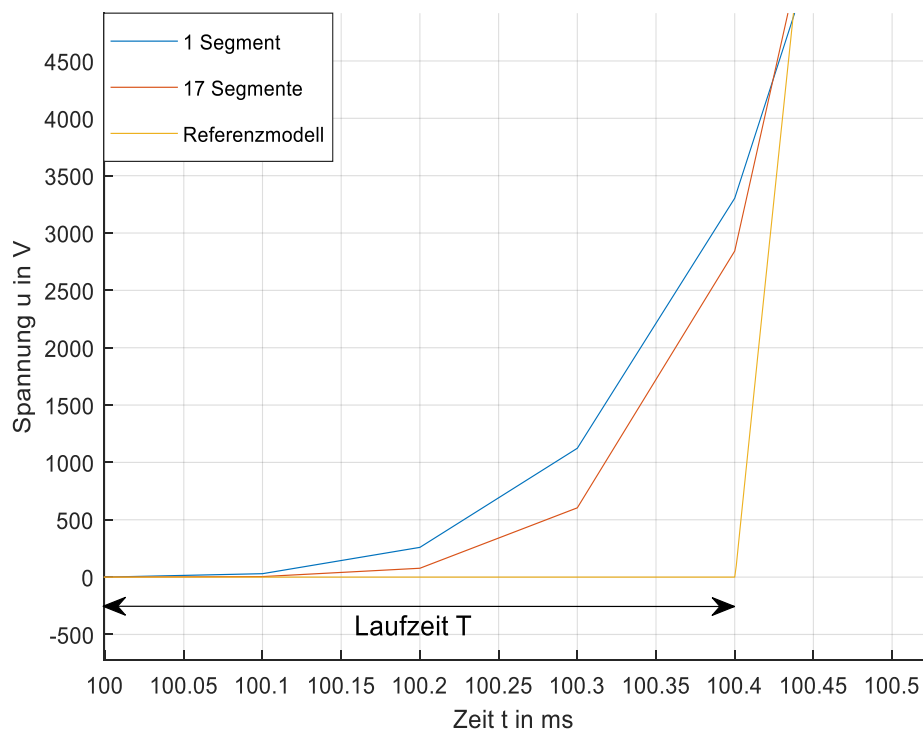


Abbildung 3-11 Einfluss der Anzahl der  $\Gamma$ -Segmente auf die Laufzeit der Wanderwelle



Eine Änderung des Netzmodells, hervorgerufen durch 3.4.1.1 bzw. 3.4.1.2 führt zu einer Zustandsänderung elektromagnetischer Felder. Diese Zustandsänderung wird durch die Ausbreitungskonstante dieser elektromagnetischen Felder beschrieben und benötigt eine bestimmte Zeit um am Leitungsanfang bzw. Leitungsende von einem Messgerät detektiert werden zu können.

Wie in Abbildung 3-11 wird bei der Simulation eines einzelnen  $\Gamma$  - Segmentes das Signal fast unverzögert angezeigt, obwohl die Wanderwelle bzw. das elektromagnetische Feld das Messgerät noch nicht erreicht haben dürfte. Idealerweise dürfte sich erst nach ca. 400 $\mu$ s eine Änderung im Signal ergeben, wie es das Referenzmodell zeigt. Es gibt für dieses Leitungsmodell keine Berücksichtigung der Ausbreitungskonstante der Wanderwelle.

Infinitesimale kleine  $\Gamma$  - Segmente würden die Laufzeit der Wanderwelle eines Signals wiedergeben. Bei starker Erhöhung der  $\Gamma$  - Segmente würde man sich dem Verhalten der Wanderwelle etwas annähern, doch beinhaltet diese Lösungsmethode Nachteile und ist daher abzuratet.

Es entsteht ein hoher Modellierungsaufwand und durch das Hintereinanderschalten der  $\Gamma$  - Segmente kommt es zu vielen Knotenpunkten, womit sich die Knotenadmittanzmatrix vergrößert. Dies würde die Berechnungszeit sehr stark erhöhen, im extremen Fall das Programm zum Abbruch bringen und die Simulation würde nicht mehr durchgeführt werden können

Durch Erhöhung der Leitungslänge würden mehr  $\Gamma$  - Segmente benötigt und über die Höchstgrenze von 20  $\Gamma$  - Segmente hinausgehen, was zu einer Verfälschung des Signals führen würde. Das Signal kann mit diesem Leitungsmodell nicht korrekt dargestellt werden.

Würde die Abtastfrequenz über die der Resonanzfrequenz  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  erhöht werden, da die Anzahl der  $\Pi$ -Segmente nicht erhöht wird, würden unerwünschte Oszillationen im Signal auftreten. Aus diesen Gründen soll ein neues verbessertes Leitungsmodell entwickelt werden, welches auch die Ausbreitungszeit der elektromagnetischen Felder berücksichtigt. In Kapitel 4 wird detailliert darauf eingegangen.

## 4 Entwicklung eines verteilten Leitungsmodells

Leitungsmodelle für transiente Vorgänge weisen eine hohe Komplexität auf, da sie neben der Zeitabhängigkeit auch die Ortsabhängigkeit der Zustandsgrößen (Spannungen und Ströme) abbilden müssen. [16] In Kapitel 3 wurde ein Modell vorgestellt, welches nur eine Zeitabhängigkeit vorweisen kann. Die Ausbreitungszeit der elektromagnetischen Felder bzw. der Wanderwelle wird in diesem Modell nicht berücksichtigt. Deshalb soll ein neues Leitungsmodell entwickelt werden, welches eine zeitabhängige und ortsabhängige Komponente beinhaltet. Dieses neu entwickelte Leitungsmodell basiert auf verteilten Leitungsparametern 2.2.3.2.

### 4.1 Implementierung

Ausgehend von den Leitungsgleichungen (Kapitel 2.2.2) ergibt sich hier ein ganz anderer Ansatz als für ein Leitungsmodell mit konzentrierten Parametern. Wie in Kapitel 2.2.4.2 beschrieben, ist die Topologie so aufgebaut, dass die zwei Terminals nicht miteinander verbunden sind und die Information indirekt um die Laufzeit der Wandewelle erfolgt. Das Signal kommt also verzögert um die Laufzeit der Wanderwelle am entsprechenden Detektor an.

Das führt auch zu einer Änderung der Ausführung der transienten Simulation basierend auf Abbildung 3-1.

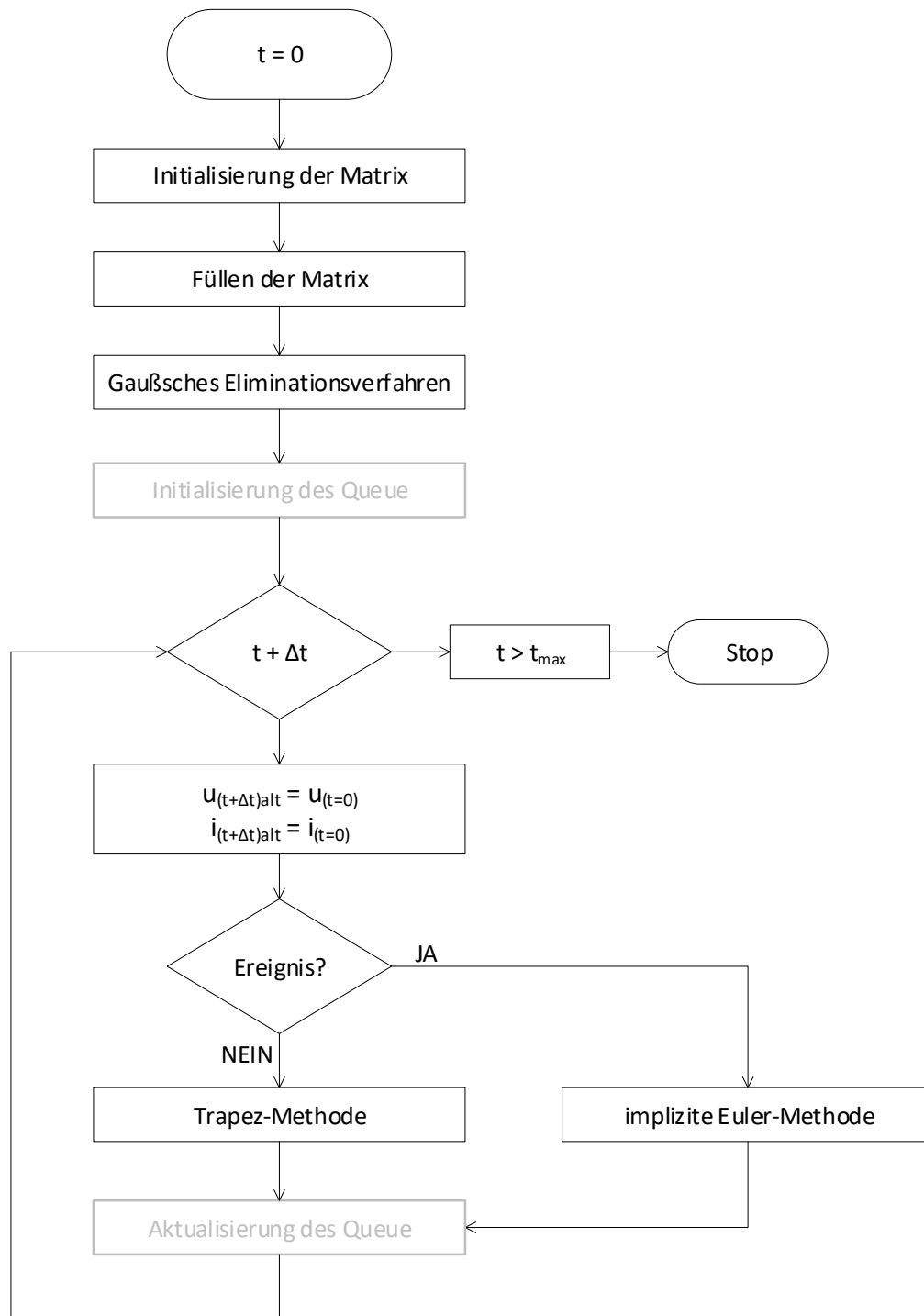


Abbildung 4-1 Ablauf der transienten Simulation im neu entwickelten Leitungsmodell

Wie schon in Abbildung 3-1 wird vor der Simulation zum Zeitpunkt  $t = 0$  anhand der Topologie des Netzmodells die benötigte Matrix erstellt. Da in diesem Modell auch die Laufzeit der Wanderwelle mitberücksichtigt wird, müssen Vergangenheitswerte gespeichert werden. Die Speicherung dieser Vergangenheitswerte erfolgt in einem Queue und ist in Kapitel 2.2.4.2 beschrieben.

Im Unterschied zur Abbildung 3-1 wird bei der Ausführung der numerischen Integrationsmethode Trapez bzw. implizite Euler ein weiterer Term berechnet. Dies entspricht Berücksichtigung der Laufzeit

der Wanderwelle. Da die Laufzeit der Wanderwelle nicht immer einem ganzzahligen Vielfachen von  $\Delta t$  entspricht, muss interpoliert werden. Dies kann zu Abweichungen in der Lösung führen.

Mit Hilfe der numerischen Integration werden nun die unbekannt Knotenspannungen und in Folge darauf die unbekannt Zweigströme berechnet. Außerdem erfolgt eine Aktualisierung der Queue, um den nächsten Zeitschritt berechnen zu können.

Der oben beschriebene Prozess wird solange ausgeführt, bis die Berechnungen für alle Zeitschritte der Simulation im definierten Simulationszeitfenster durchgeführt sind.

### Trapez-Methode:

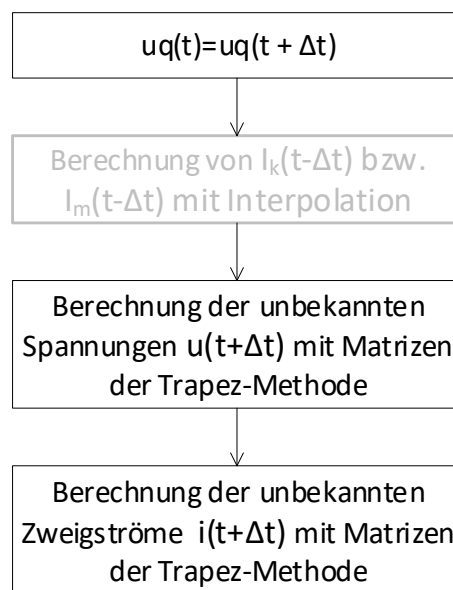
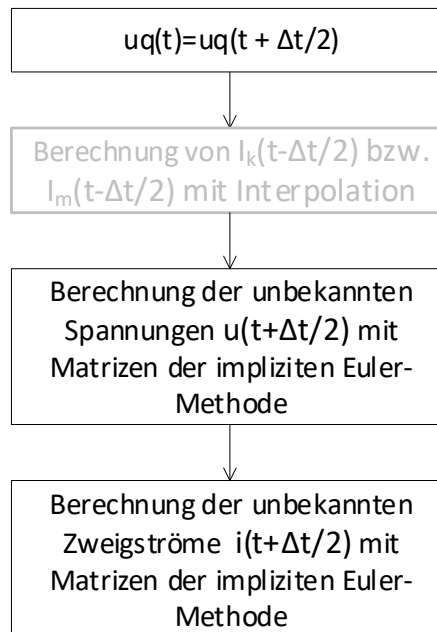


Abbildung 4-2 Trapez-Methode mit Zeitschrittlänge  $\Delta t$  und Interpolation

**Implizite Euler-Methode:**



*Abbildung 4-3 Implizite Euler-Methode mit Zeitschrittlänge  $\Delta t/2$  und Interpolation*

Eine Änderung des Zeitschrittes, durch Anwendung der impliziten Euler-Methode, kann aber dazu führen, dass bei bestimmter Länge der Laufzeit der Wanderwelle keine Queue ermittelt werden kann. In Kapitel 4.1.1 soll das näher erläutert werden.

### 4.1.1 Erweiterung der Queue

Bei Verwendung der impliziten Euler-Methode kann es bei der Berechnung zu einem Fehler bei der Interpolation kommen. Abbildung 4-4 soll das verdeutlichen.

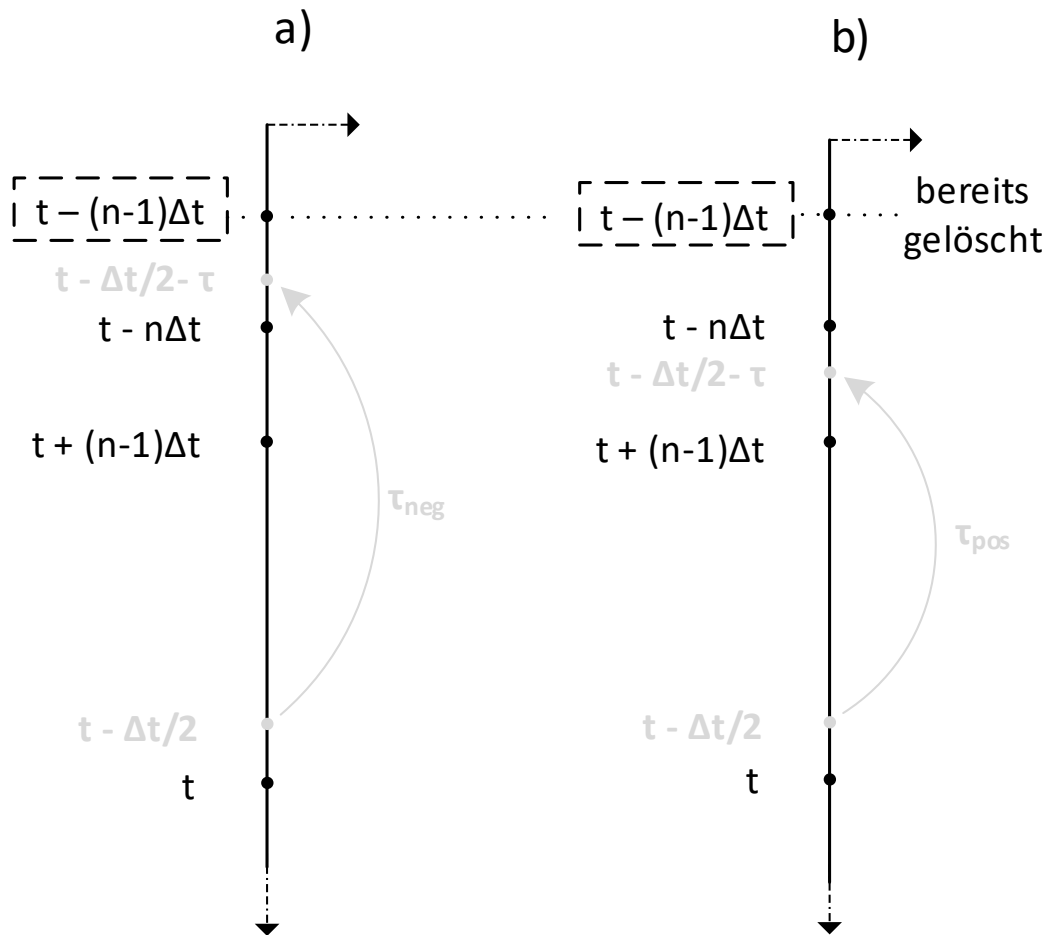


Abbildung 4-4 a) Fehler im Queue b) kein Fehler im Queue

Abhängig von der Länge der Laufzeit der Wanderwelle kann es zu zwei unterschiedlichen Fällen kommen. In beiden Abbildungen wird jeweils der Zeitschritt  $t - \Delta t/2$  berechnet.

$$\text{a) } t - \frac{1}{2}\Delta t - \tau - n\Delta t < 0$$

$$\text{b) } t - \frac{1}{2}\Delta t - \tau - n\Delta t > 0$$

Die rechte Abbildung b) zeigt, dass nach der Berücksichtigung der Laufzeit  $\tau_{pos}$  zwischen  $t - n\Delta t$  und  $t + (n-1)\Delta t$  interpoliert werden kann und somit kein Fehler auftritt.

In der linken Abbildung a) befindet sich der zu berechnende Wert nach Berücksichtigung der Laufzeit  $\tau_{neg}$  zwischen  $t - (n-1)\Delta t$  und  $t - n\Delta t$ . Der Zeitpunkt  $t - (n-1)\Delta t$  wurde aber schon bei der Berechnung

des vorherigen Wertes  $t - \Delta t$  verwendet und wäre in dem Fall gelöscht. Es kann nicht mehr interpoliert werden.

Das Problem wird gelöst, indem stets der letzte bzw. älteste Vergangenheitswert in einer separaten Queue gespeichert wird. Tritt nun der Fall a) ein, kann auf den separaten Speicher zurückgegriffen werden und es tritt kein Fehler bei der Interpolation zur Berechnung des Wertes von  $t - \Delta t/2 - \tau$  auf.

Da aber in RelaySimTest nur eine geringe Abtastfrequenz von 10 kHz verwendet werden kann, kann es zu Genauigkeitsfehlern bzw. Interpolationsfehlern kommen, welche das Signal verfälschen können.

### 4.1.2 Integrierung der Leitungsverluste

Bisher wurde ein verlustloses Leitungsmodell mit verteilten Parametern (Kapitel 2.2.4.2) betrachtet. Für eine wirklichkeitsgetreue Nachbildung einer Freileitung müssen aber auch die Leitungsverluste  $R'$  bzw.  $G'$  (Kapitel 2.2.1), hinzugefügt werden. Obwohl die „Mathematische Methode der Charakteristiken“ auf verlustbehafteten Leitungen anwendbar ist, sind die Differentialgleichungen, die diese Methode erzeugt, nicht direkt integrierbar und lösbar. [8]

Daher werden hier einfachere Ansätze zur Integration der Leitungsverluste verwendet. Es sollen verschiedene Möglichkeiten zur Modellierung von Leitungsverlusten näher erläutert werden. [1, 19]

#### 4.1.2.1 Verzerrungsfreies Leitungsmodell

Die Vereinfachung der Lösung der Telegraphengleichung (Kapitel 2.2.2) beruht darauf, dass die Leitungsverluste vernachlässigt werden. Diese Vereinfachung kann auch für ein verzerrungsfreies Leitungsmodell angenommen werden. Ein verzerrungsfreies Leitungsmodell basiert auf der Heaviside-Bedingung. Das bedeutet, dass die Leitungsparameter  $R'$ ,  $G'$ ,  $C'$  und  $L'$  ein bestimmtes Verhältnis aufweisen müssen.

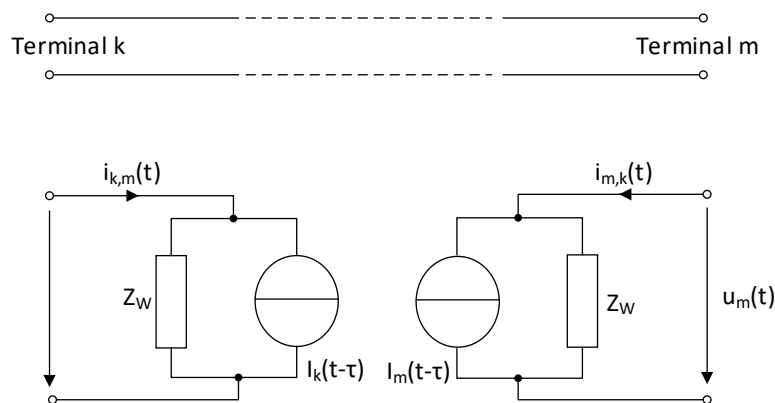


Abbildung 4-5 Verzerrungsfreies Leitungsmodell mit verteilten Leitungsverlusten

Ein Leitungsmodell ist verzerrungsfrei, wenn das Verhältnis von  $R'$  bzw.  $L'$  im gleichen Verhältnis zu  $G'$  bzw.  $C'$  steht. Es kann das gleiche Leitungsmodell wie im verlustlosen Fall herangezogen werden. Der einzige Unterschied besteht in der Berechnung von den Gleichungen (2-44) und (2-45)(2-46).

Es wird ein Faktor hinzu multipliziert, was aber keinen Einfluss auf die Topologie nimmt. Die Verluste können dadurch verteilt auf der gesamten Leitungslänge angenommen werden.

Terminal k:

$$i_{k,m}(t) = \frac{1}{Z_W} u_m(t) + I_k(t - \tau) \quad (4-1)$$

$$I_k(t - \tau) = e^{\left(\frac{R'}{L'}\right)\tau} \left[ -\frac{1}{Z_W} u_m(t - \tau) - i_{m,k}(t - \tau) \right] \quad (4-2)$$



Terminal m:

$$i_{m,k}(t) = \frac{1}{Z_W} u_m(t) + I_m(t - \tau) \quad (4-3)$$

$$I_m(t - \tau) = e^{\left(\frac{-R'}{L'}\right)\tau} \left[ -\frac{1}{Z_W} u_k(t - \tau) - i_{k,m}(t - \tau) \right] \quad (4-4)$$

Freileitungen sind aber nicht verzerrungsfrei, da  $G'$  normalerweise vernachlässigbar klein ist. Diese Methode limitiert die Wahl von  $G'$ , da es von den übrigen Leitungsparametern abhängig ist. Beispielsweise bei einem einpoligen Kurzschluss, könnte sich ein ungünstig berechnetes  $G'$  ergeben. Dies würde zu einer sehr langen Abklingzeit und somit zu einer Verfälschung des Signales führen.

#### 4.1.2.2 Verlustlose Leitung mit konzentrierten Elementen – Modell R-4

Der verteilte Serienwiderstand  $R'$ , wobei  $G'$  vernachlässigt werden kann, kann leicht angenähert werden, indem die Leitung als verlustlos behandelt wird und an beiden Enden des verlustlosen Leitungsmodelles konzentrierte Widerstände mit jeweils  $R/4$ <sup>9</sup> hinzugefügt werden. Daraus ergibt sich ein Leitungsmodell mit jeweils  $R/4$  an den Enden der Leitung und  $R/2$  in der Mitte. Folgende Abbildung soll dies veranschaulichen.

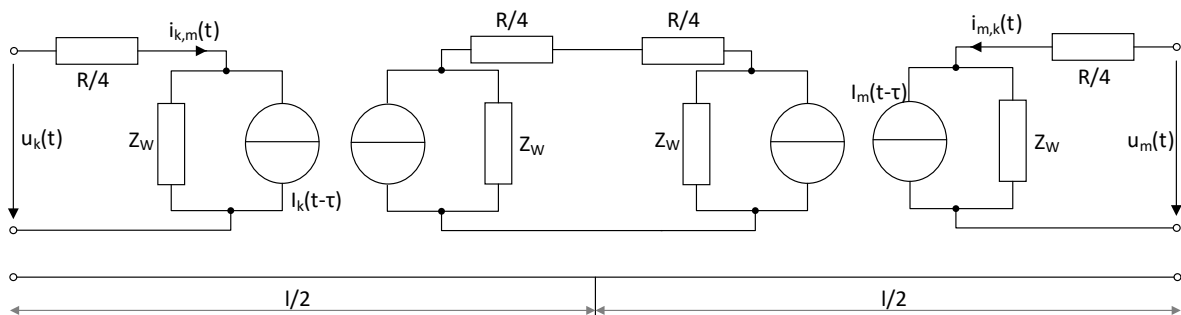


Abbildung 4-6 Verlustloses Leitungsmodell mit konzentrierten Verlustparametern – Modell R-4

Mit dieser Annahme ist das verlustlose Leitungsmodell noch gültig und Gleichung (2-43) und (2-44) für Terminal k bzw. die Gleichung (2-45) und (2-46) für Terminal m ändern sich wie folgt:

Terminal k:

$$i_{k,m}(t) = \frac{1}{Z_{modified}} u_k(t) + I_k(t - \tau) \quad (4-5)$$

<sup>9</sup> R ist der Gesamtwiderstand der Leitung

$$I_k(t - \tau) = -\frac{Z_W}{Z_{\text{modified}}^2} \left[ u_m(t - \tau) + \left( Z_W - \frac{R}{4} \right) i_{m,k}(t - \tau) \right] - \frac{\frac{R}{4}}{Z_{\text{modified}}^2} \left[ u_k(t - \tau) + \left( Z_W - \frac{R}{4} \right) i_{k,m}(t - \tau) \right] \quad (4-6)$$

$$Z_{\text{modified}} = Z_W + \frac{R}{4} \quad (4-7)$$

Terminal m:

$$i_{m,k}(t) = \frac{1}{Z_{\text{modified}}} u_m(t) + I_m(t - \tau) \quad (4-8)$$

$$I_m(t - \tau) = -\frac{Z_W}{Z_{\text{modified}}^2} \left[ u_k(t - \tau) + \left( Z_W - \frac{R}{4} \right) i_{k,m}(t - \tau) \right] - \frac{\frac{R}{4}}{Z_{\text{modified}}^2} \left[ u_m(t - \tau) + \left( Z_W - \frac{R}{4} \right) i_{m,k}(t - \tau) \right] \quad (4-9)$$

Solche konzentrierten Widerstände können an vielen Stellen entlang der Leitung eingefügt werden, wenn die Gesamtlänge in mehrere Leitungsabschnitte unterteilt wird. Interessanterweise gibt es keinen merklichen Unterschied zwischen konzentrierten Widerständen, die an wenigen oder vielen Stellen eingesetzt wurden, solange die Bedingung  $R \ll Z_W$  gilt.

Aufgrund der Begrenzung der Abtastrate von 10kHz hat dieses Modell gegenüber Modell R-2 einen Nachteil, da hier zweimal interpoliert werden muss und somit das Signal leichter verfälscht werden kann.

#### 4.1.2.3 Verlustlose Leitung mit konzentrierten Elementen – Modell R-2

Wie in Kapitel 4.1.2.2 kann auch das Modell R-2 leicht an den verteilten Serienwiderstand  $R'$  angenähert werden. Dieses Modell ist sehr einfach zu modellieren. Es wird jeweils ein konzentrierter Widerstand mit  $R/2$  an beiden Enden hinzugefügt und es muss keine Teilung der Leitungslänge erfolgen.

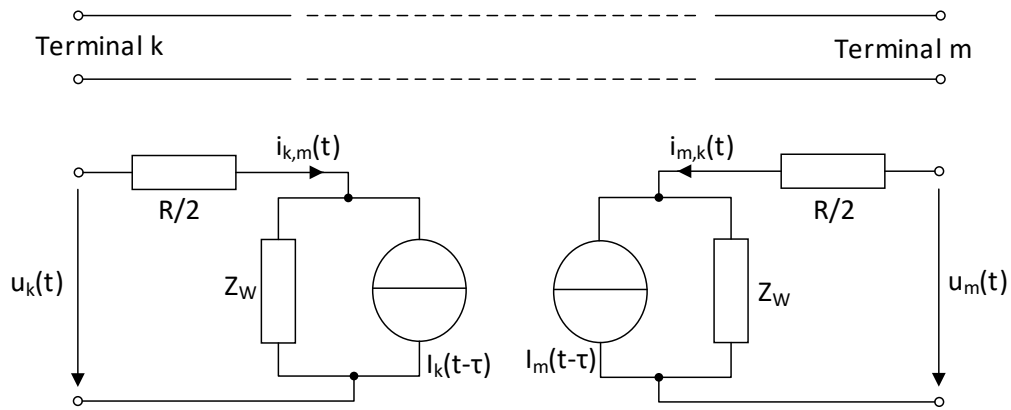


Abbildung 4-7 Verlustloses Leitungsmodell mit konzentrierten Verlustparametern – Modell R-2

Somit kann auch hier das verlustlose Leitungsmodell beibehalten werden und die Gleichungen (2-43) und (2-44) für Terminal k bzw. die Gleichungen (2-45) und (2-46) für Terminal m ändern sich wie folgt:

Terminal k:

$$i_{k,m}(t) = \frac{1}{Z_{\text{modified}}} u_k(t) + I_k(t - \tau) \quad (4-10)$$

$$I_k(t - \tau) = -\frac{1}{Z_{\text{modified}}} \left[ u_m(t - \tau) + \left( Z_W - \frac{R}{2} \right) i_{m,k}(t - \tau) \right] \quad (4-11)$$

$$Z_{\text{modified}} = Z_W + \frac{R}{2} \quad (4-12)$$

Terminal m:

$$i_{m,k}(t) = \frac{1}{Z_{\text{modified}}} u_m(t) + I_m(t - \tau) \quad (4-13)$$

$$I_m(t - \tau) = -\frac{1}{Z_{\text{modified}}} \left[ u_k(t - \tau) + \left( Z_W - \frac{R}{2} \right) i_{k,m}(t - \tau) \right] \quad (4-14)$$

## 4.2 Vergleich der Leitungsmodelle und Verifikation der implementierten numerischen Berechnungsmethode

Hierbei soll festgestellt werden, wie sich die neu entwickelten Leitungsmodelle verhalten und wie genau die Ergebnisse übereinstimmen. Auch soll ein Vergleich des aktuellen Leitungsmodell herangezogen werden um Unterschiede und Verbesserungen zu zeigen. Außerdem soll das neu entwickelte Leitungsmodell mit der Software Matlab/Simulink verglichen werden, die als Referenz dienen soll.

### 4.2.1 Vergleich der Modelle anhand von repräsentativen Fehlerfällen

Zur Veranschaulichung der Resultate des neu entwickelten Leitungsmodells mit verteilten Parametern werden zwei repräsentative Beispiele simuliert:

- Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung
- Einpoliger Erdschluss am Ende der Leitung

In den Abbildungen 4-9 – 4-27 werden Beispiele mit unterschiedlichen Spannungsebenen und Leitungslängen gezeigt. Die Abbildungen enthalten folgende Kennzeichnung für die einzelnen Modelle:

- $\pi$ : aktuelles Leitungsmodell (Kapitel 3.3)
- R2: neu entwickeltes Leitungsmodell mit verteilten Parametern und konzentrierten Verlusten (Kapitel 4.1.2.3)
- R4: neu entwickeltes Leitungsmodell mit verteilten Parametern und konzentrierten Verlusten (Kapitel 4.1.2.2)
- ver: neu entwickeltes Leitungsmodell mit verzerrungsfreien Parametern (Kapitel 4.1.2.1)
- ref: Referenzmodell mit einer Abtastrate von 2 MHz auf Basis des verzerrungsfreien Leitungsmodells, welches exakt berechnet werden kann und zu keinem Interpolationsfehler führt

#### 4.2.1.1 Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung

Zur Erregung der dreiphasigen Leitung wird eine symmetrische dreiphasige Spannungsquelle verwendet. Die Spannungsquelle wird am Leitungsanfang angeschlossen und es sollen verschiedene Spannungsebenen betrachtet werden. Außerdem soll die Leitungslänge variiert werden.

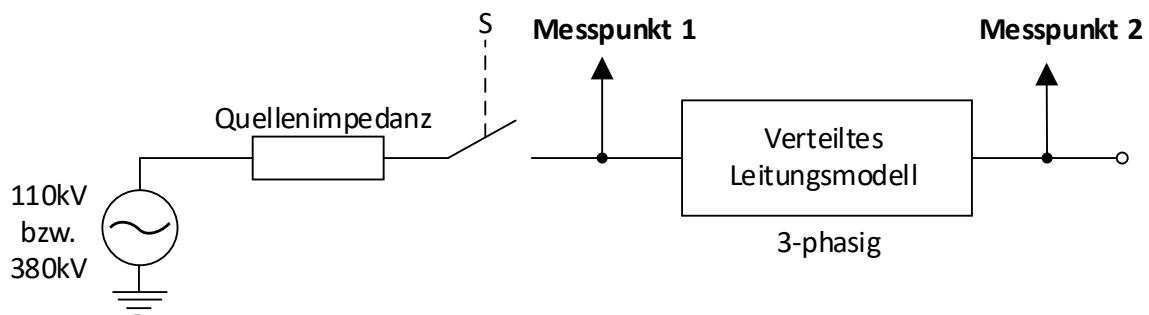


Abbildung 4-8 Schaltungsaufbau – Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung

Die Zuschaltung der dreiphasigen Leitung erfolgt mit Hilfe eines Schalters S zum Zeitpunkt  $t = 100\text{ms}$ . Die Simulation zeigt jeweils eine Phase der Strommessung am Anfang der Leitung (Messpunkt 1) bzw. der Spannungsmessung am offene Ende (Messpunkt 2).

**i. Spannungsebene 110kV mit einer Leitungslänge von 100km**

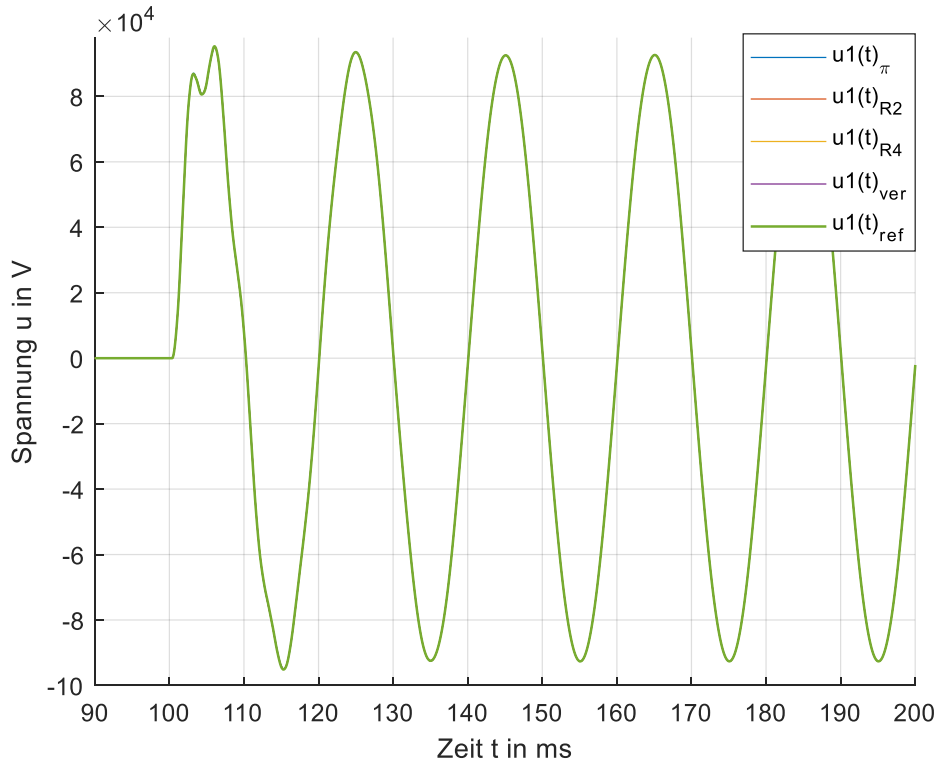


Abbildung 4-9 Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung – Spannung der Phase 1 am Messpunkt 2

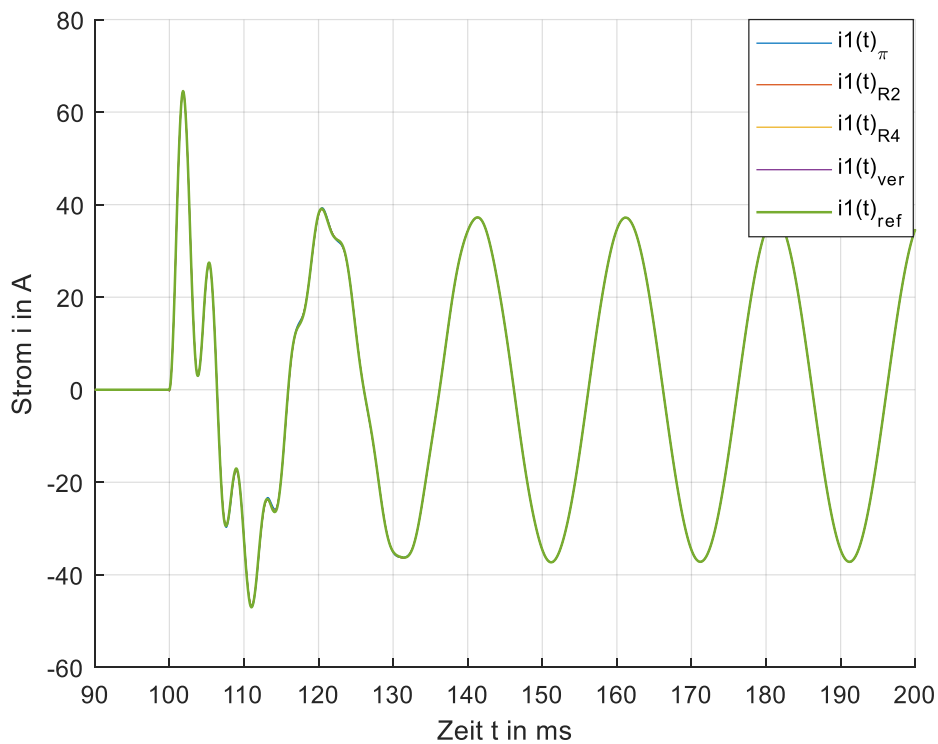


Abbildung 4-10 Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung – Strom der Phase 1 am Messpunkt 1

ii. Spannungsebene 380kV mit einer Leitungslänge von 300km

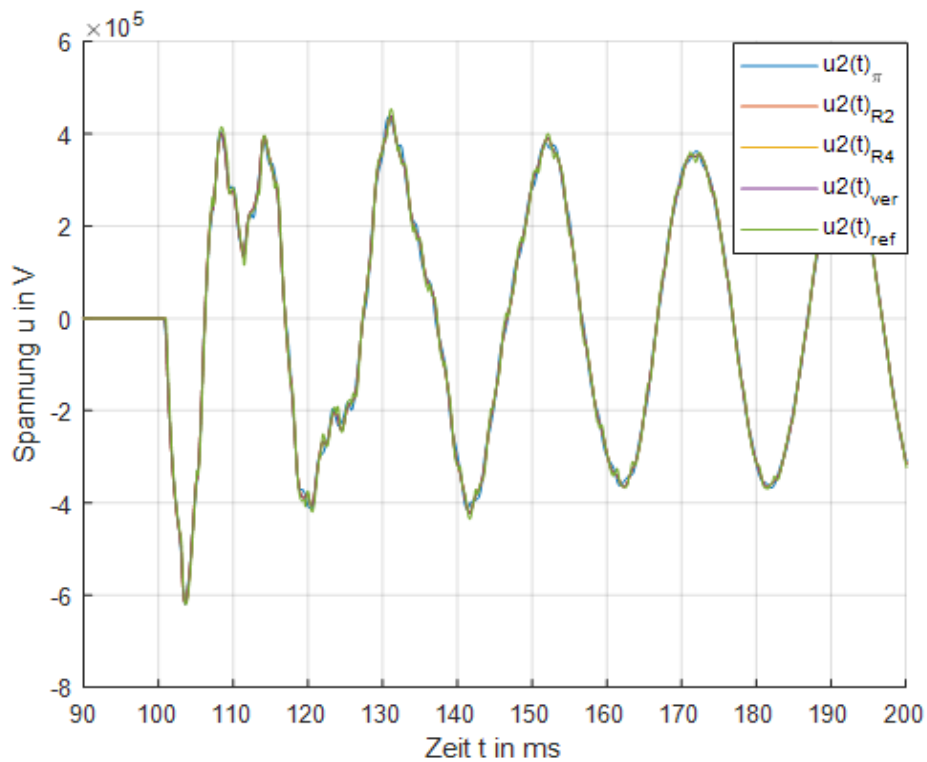


Abbildung 4-11 Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung – Spannung der Phase 2 am Messpunkt 2

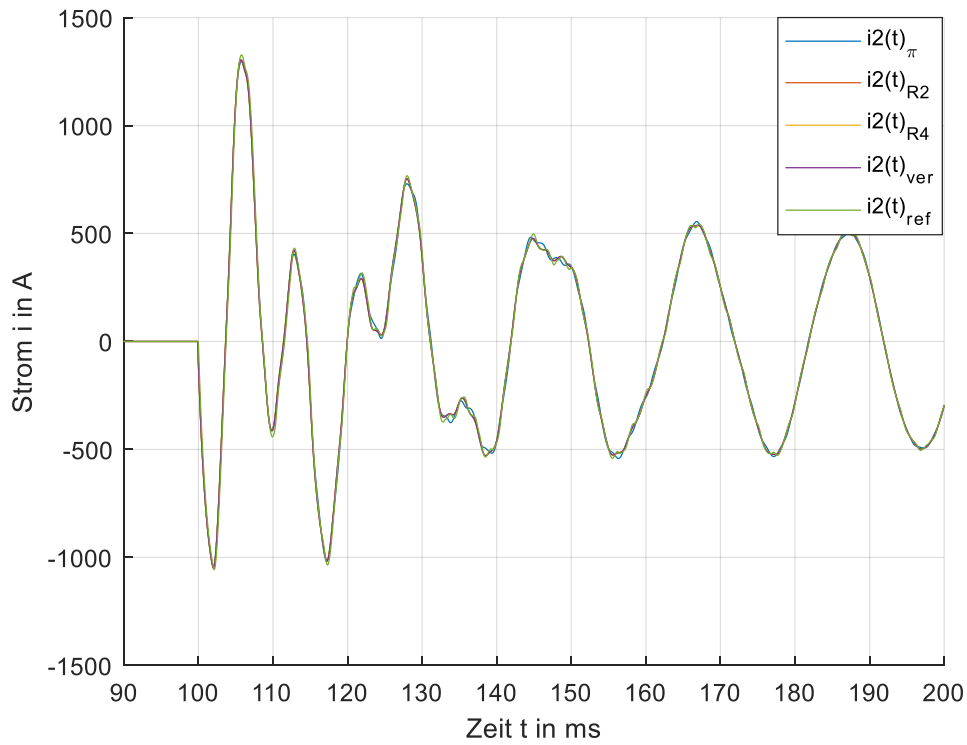


Abbildung 4-12 Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung – Strom der Phase 2 am Messpunkt 1

iii. Spannungsebene 110kV mit einer Leitungslänge von 25km

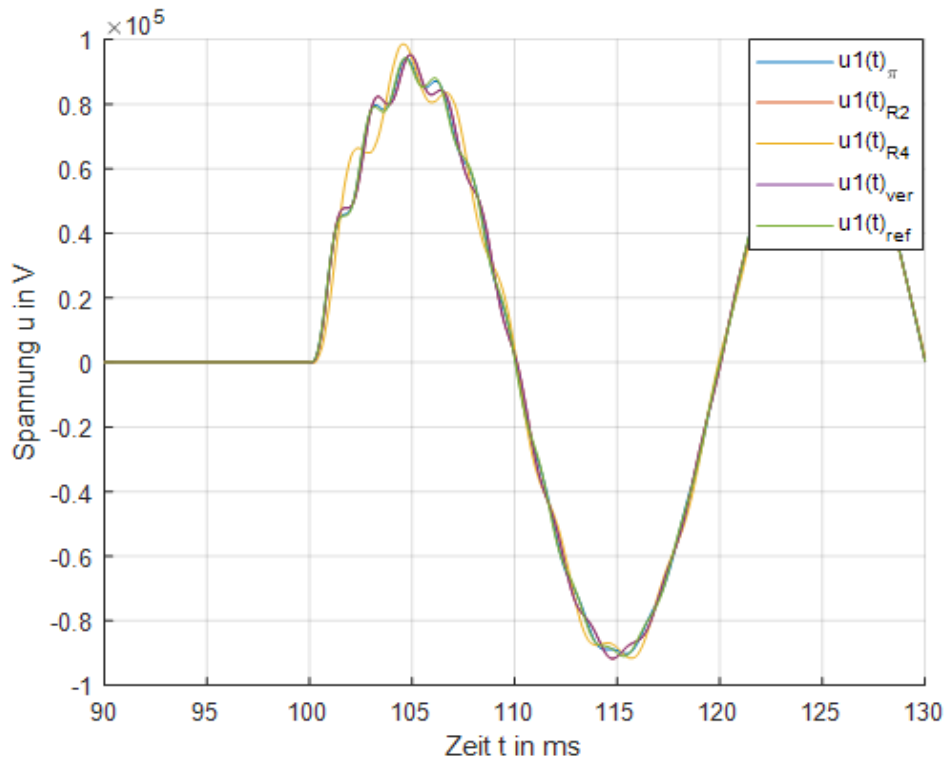


Abbildung 4-13 Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung – Spannung der Phase 1 am Messpunkt 2

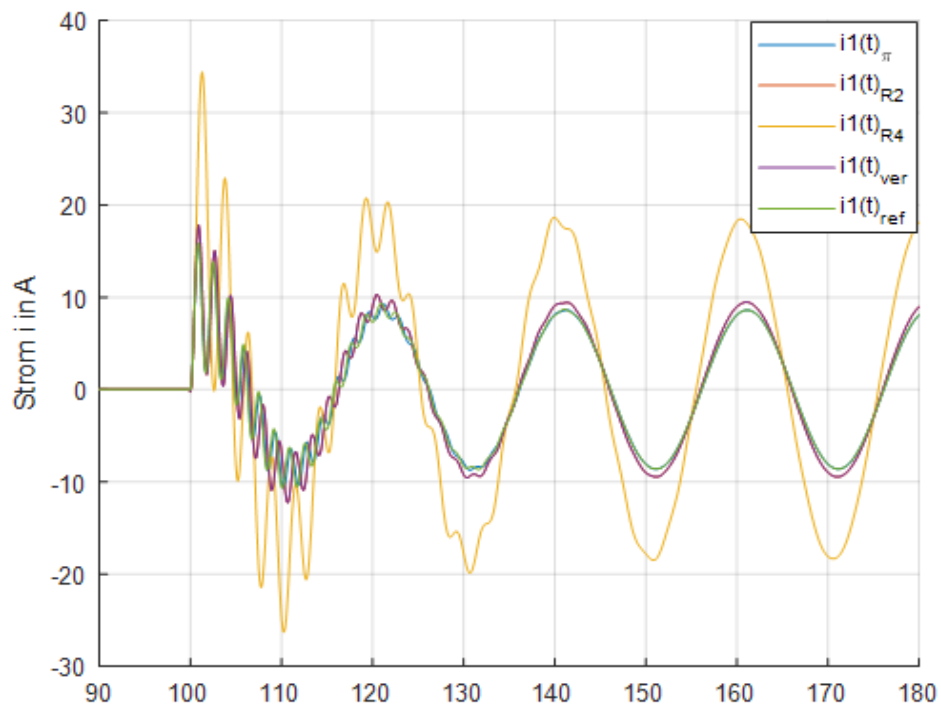


Abbildung 4-14 Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung – Strom der Phase 1 am Messpunkt 1

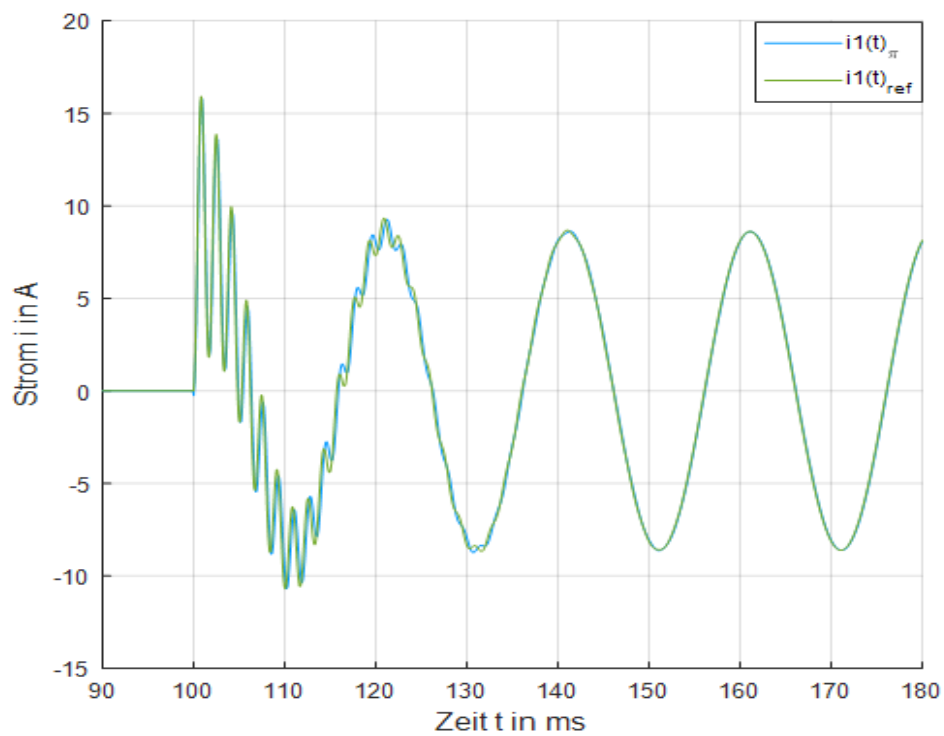


Abbildung 4-15 Vergleich des aktuellen Leitungsmodells mit dem Referenzmodell



Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei Abbildung 4-9, Abbildung 4-10, Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 alle neu entwickelten Modelle, sowie auch das aktuell verwendete Modell eine hohe Übereinstimmung vorweisen können. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier keine großen elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge stattfinden und somit auch das aktuell verwendete Modell gute Resultate zeigt.

Bei zu kurzer Leitungslänge beginnen aber die neu entwickelten Modelle vom Referenzmodell abzuweichen, was auf die kleine Abtastrate zurückzuführen ist. Dies verursacht einen Interpolationsfehler und dadurch werden die Signalverläufe verfälscht, was in Abbildung 4-13 bzw. in Abbildung 4-14 zu sehen ist. Vor allem das entwickelte Modell R-4 zeigt hier große Abweichungen zum Referenzmodell, aufgrund der doppelt durchgeführten Interpolation.

In Abbildung 4-15 sieht man einen Vergleich mit dem aktuell verwendeten Modell und dem Referenzmodell, welches eine hohe Übereinstimmung aufweist. Aufgrund dessen, dass in diesem Modell keine mathematische Interpolation erfolgen muss, ist bei kürzeren Leitungslängen dieses Modell zu bevorzugen.

Deshalb soll auch nach einem Kriterium gesucht werden, ab wann es sinnvoll ist, das neu entwickelte Leitungsmodell einzusetzen.

#### 4.2.1.2 Einpoliger Kurzschluss am Ende der Leitung

Kurzschlüsse sind einer der häufigsten Fehler in elektrischen Energiesystemen. Je nach Zeitpunkt des Fehlereintrittes kommt es zu unterschiedlichen elektromagnetischen Ausgleichsvorgängen welche hohe Spannungs- bzw. Stromspitzen erzeugen. Es kann in Folge zu erhöhten Isolationsbeanspruchungen kommen

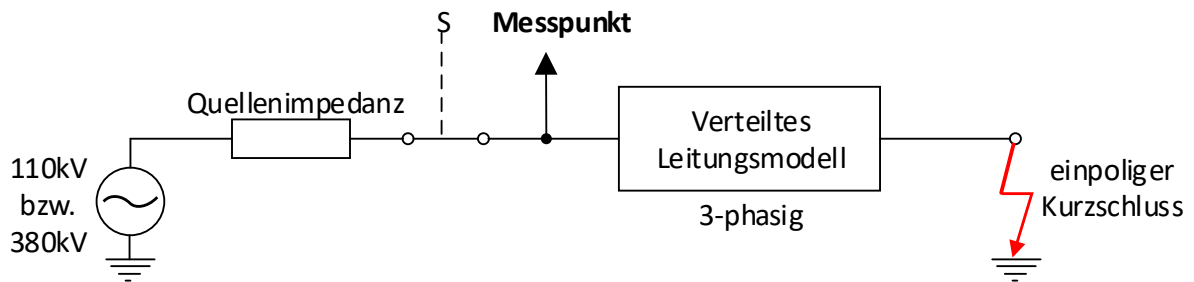


Abbildung 4-16 Schaltungsaufbau – einpoliger Kurzschluss am Ende der Leitung

Die Erregung erfolgt durch eine dreiphasige Spannungsquelle. Es sollen unterschiedliche Spannungsebenen untersucht werden und eine Variierung der Leitungslänge erfolgen. Der Schalter S ist vorerst geschlossen. Nach 105ms nach Beginn der Simulation kommt es zu einem einpoligen Kurzschluss mit einem Spannungseintrittswinkel von  $90^\circ$ . Die Messpunkte von Strom und Spannung befinden sich am Anfang der Leitung (Messpunkt).

i. Spannungsebene 110kV mit einer Leitungslänge von 100km

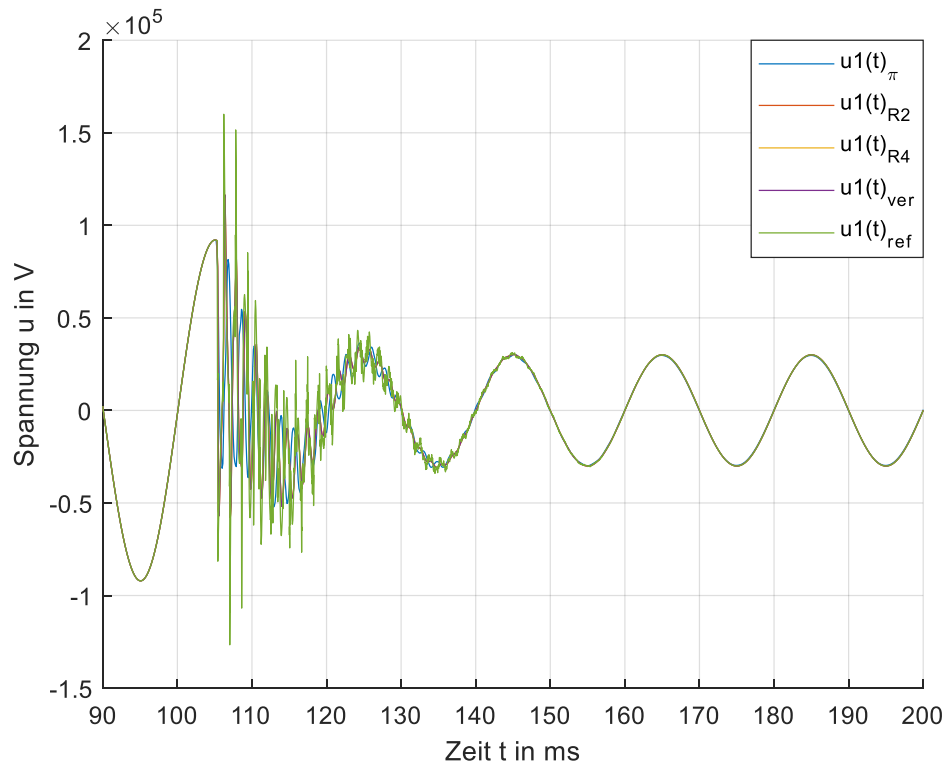


Abbildung 4-17 Einpoliger Kurzschluss 110kV/100km – Spannung der fehlerbehafteten Phase 1 am Messpunkt

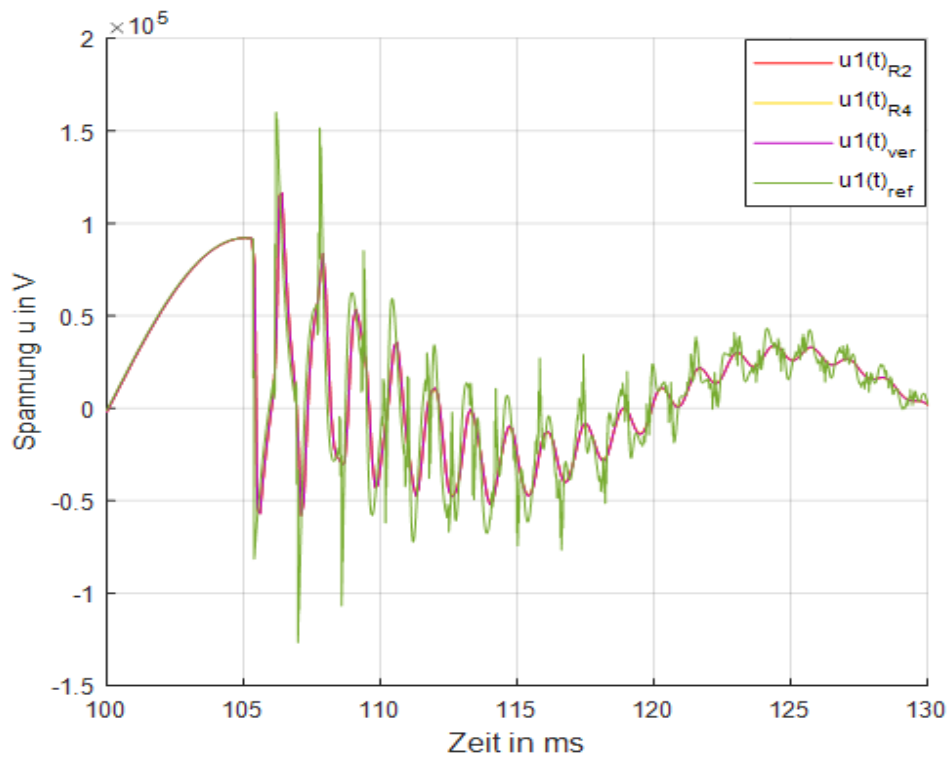


Abbildung 4-18 Einpoliger Kurzschluss 110kV/100km – ohne aktuelles Leitungsmodell

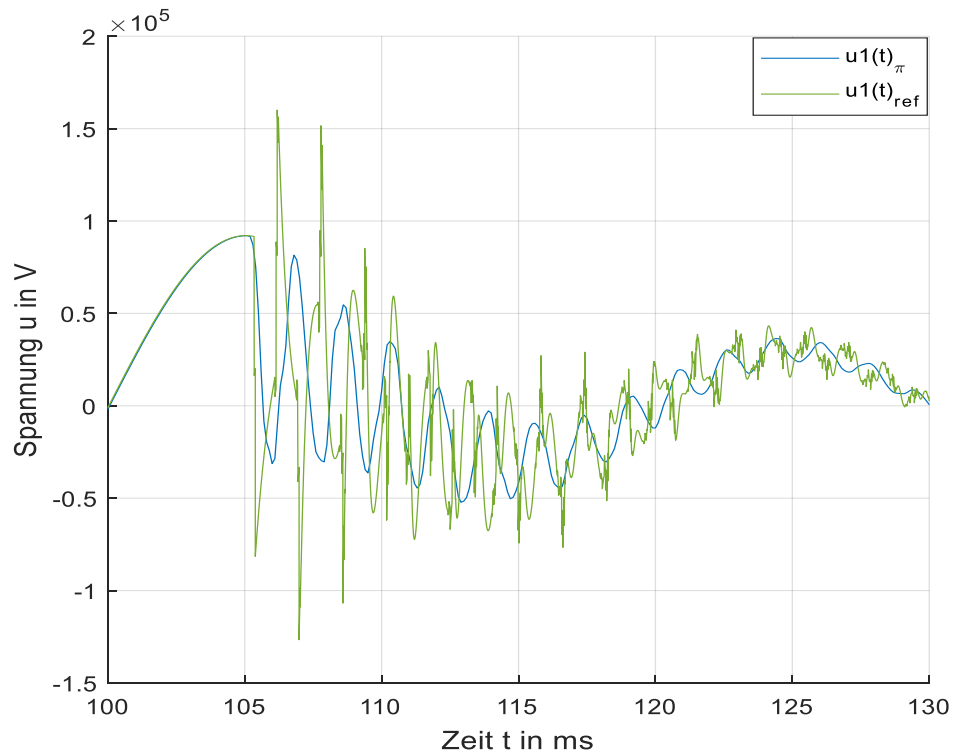


Abbildung 4-19 Einpoliger Kurzschluss 110kV/100km – ohne neu entwickelte Leitungsmodelle

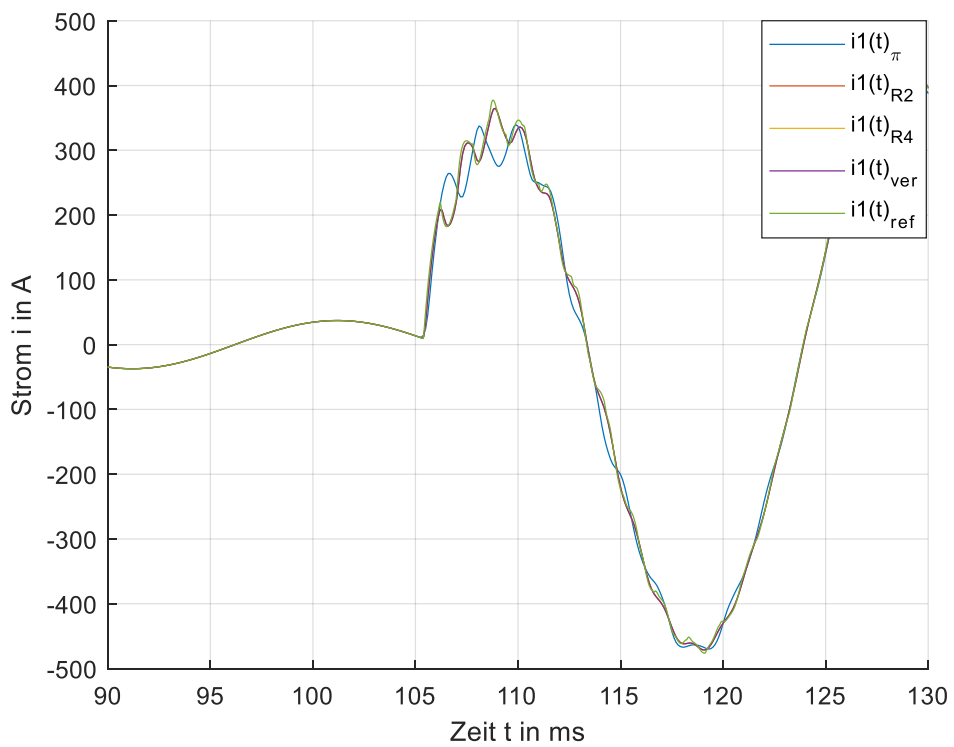


Abbildung 4-20 Einpoliger Kurzschluss 110kV/100km – Strom der fehlerbehafteten Phase 1 am Messpunkt

ii. Spannungsebene 380kV mit einer Leitungslänge von 300km

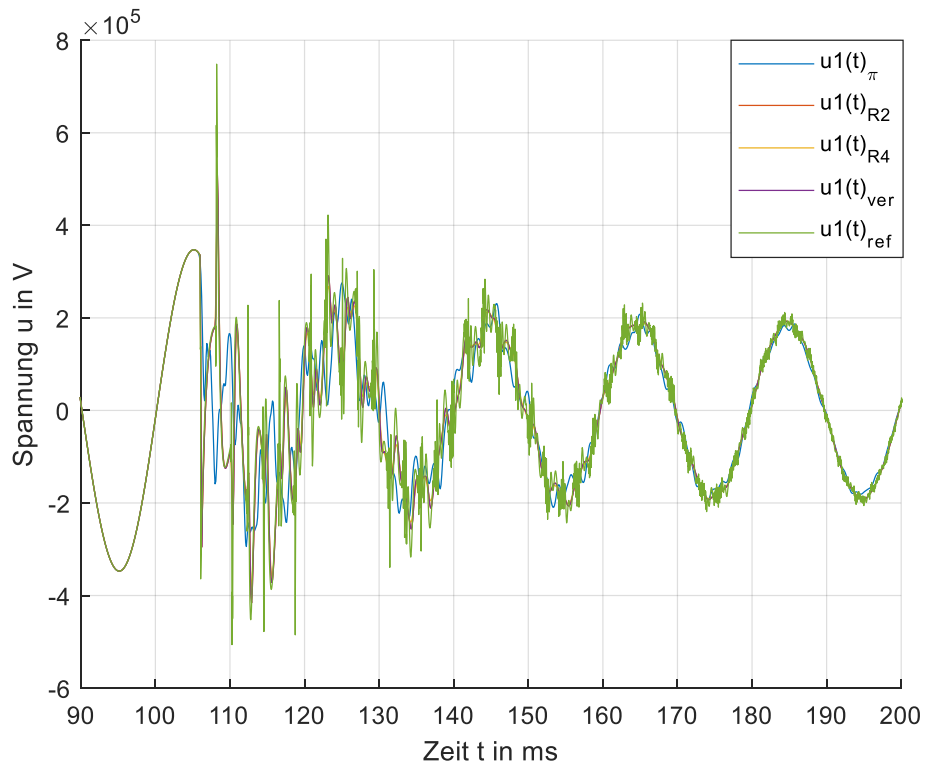


Abbildung 4-21 Einpoliger Kurzschluss 380kV/300km – Spannung der fehlerbehafteten Phase 1 am Messpunkt

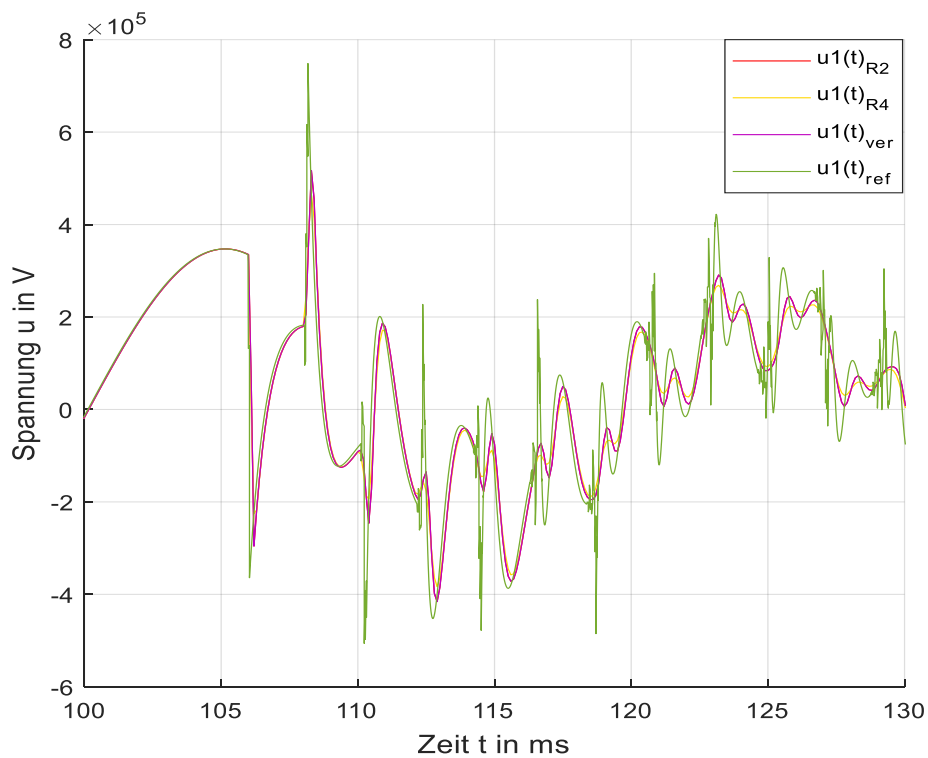


Abbildung 4-22 Einpoliger Kurzschluss 380kV/300km – ohne aktuelles Leitungsmodell

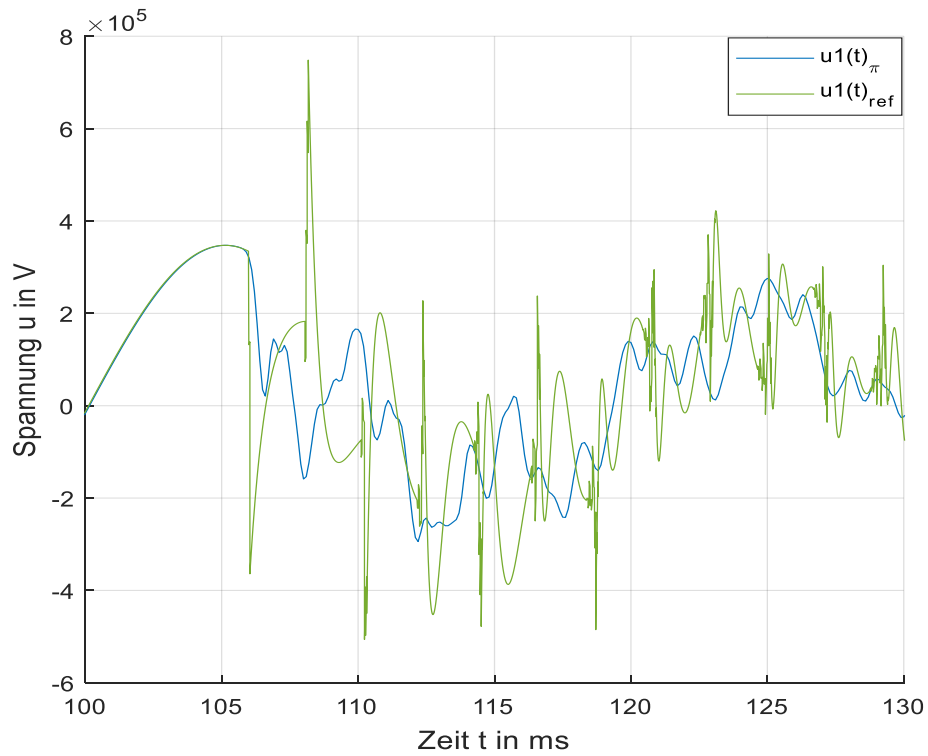


Abbildung 4-23 Einpoliger Kurzschluss 380kV/300km – ohne neu entwickelte Leitungsmodelle

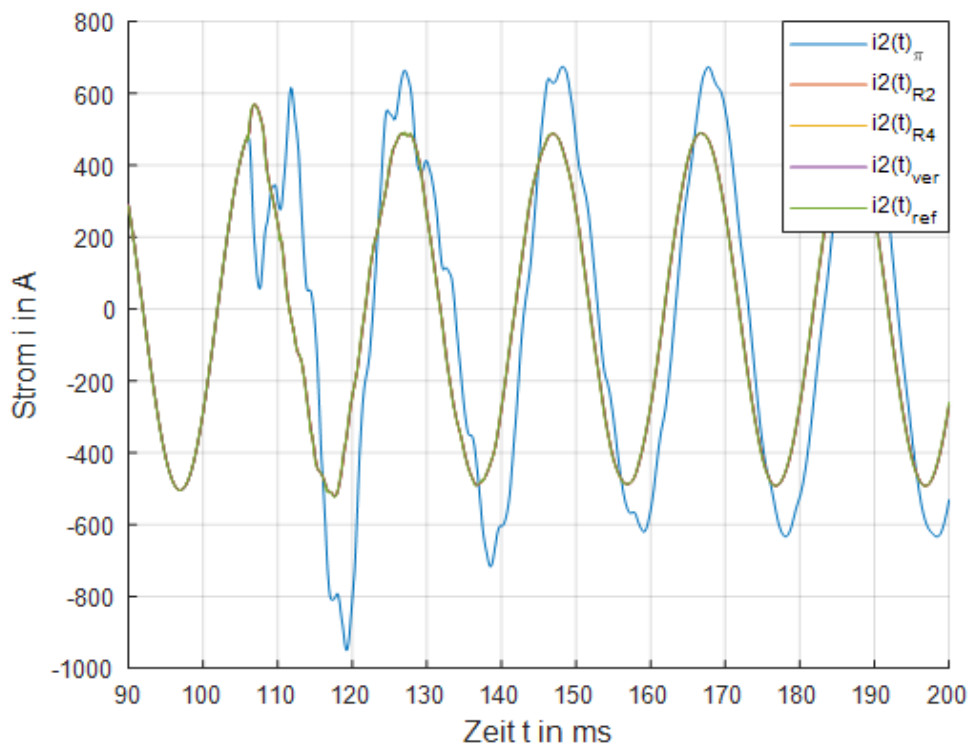


Abbildung 4-24 Einpoliger Kurzschluss 380kV/300km – Strom der Phase 2 am Messpunkt

iii. Spannungsebene 110kV mit einer Leitungslänge von 30km

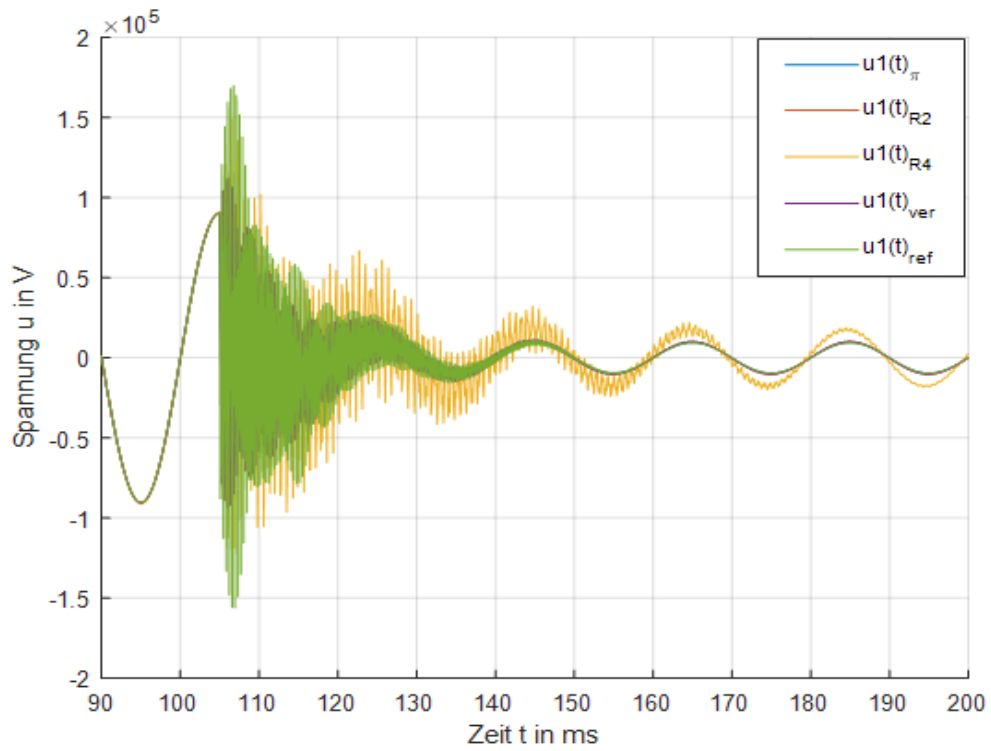


Abbildung 4-25 Einpoliger Kurzschluss 110kV/30km – Spannung der fehlerbehafteten Phase 1 am Messpunkt

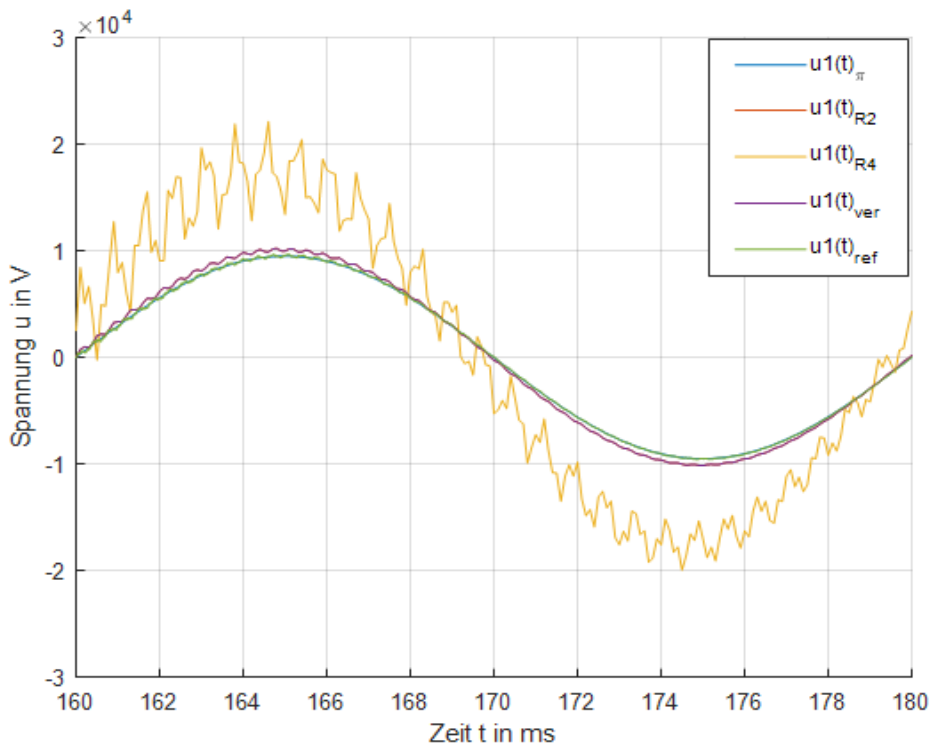


Abbildung 4-26 Einpoliger Kurzschluss 110kV/30km – gezoomte Darstellung der Phase 1

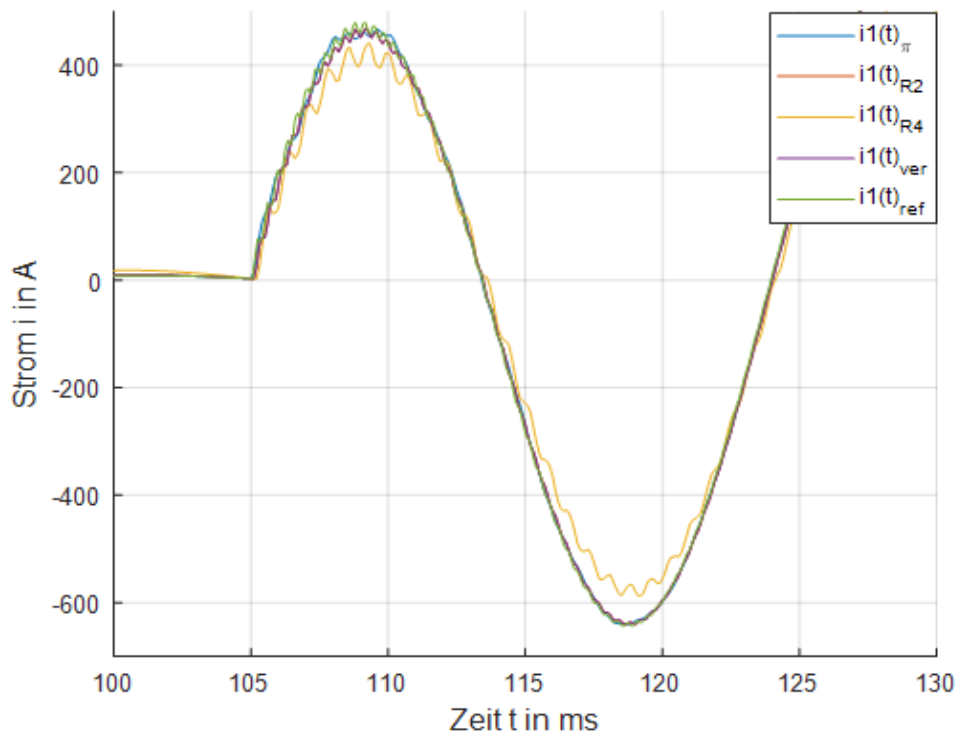


Abbildung 4-27 Einpoliger Kurzschluss 110kV/30km – Strom der fehlerbehafteten Phase 1 am Messpunkt

Im Gegensatz zum Fall der Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung (Kapitel 4.2.1.1) entstehen bei einem einpoligen Kurzschluss aufgrund der starken Stromsteilheit  $di/dt$  sehr kräftige elektromagnetische Ausgleichsvorgänge.

Die Simulationsergebnisse zeigen doch deutliche Unterschiede zum aktuell verwendeten Leitungsmodell. In Abbildung 4-18 bzw. ist ersichtlich, dass das neu entwickelte Leitungsmodell den Spannungsverlauf der fehlerbehafteten Phase besser wiedergeben kann als in Abbildung 4-19 ersichtlich.

Je länger die Leitungslänge wird, umso genauer wird das neu entwickelte Leitungsmodell, was sich in Abbildung 4-22 bzw. Abbildung 4-23 widerspiegelt. Das aktuell verwendete Leitungsmodell kann dem Spannungsverlauf des Referenzmodells in keiner Hinsicht mehr folgen und versagt hier.

Abbildung 4-24 zeigt dem Stromverlauf bei einer 300 km langen Leitung der nicht fehlerbehafteten Phase 2. Aufgrund der Begrenzung der  $\Pi$ -Segmente kommt es hier zu unerwünschten Oszillationen, da nun die Resonanzfrequenz von L bzw. C unter die Abtastfrequenz gefallen ist. Würde die Anzahl der  $\Pi$ -Segmente weiter erhöht werden, würde es nicht zu diesem Effekt kommen.

Wie schon in Kapitel 4.2.1.1 ist zu erkennen, dass wenn die Leitungslänge zu kurz wird, es zu Abweichungen im neu entwickelten Leitungsmodell kommt. Vor allem das entwickelte Modell R-4 zeigt hier aufgrund der doppelt durchgeführten Interpolation und der niedrigen Abtastrate große Abweichungen vom Referenzmodell, wie in Abbildung 4-25, Abbildung 4-26 und Abbildung 4-27



ersichtlich. Würde die Länge weiter verkürzt werden, würde auch das verzerrungsfreie Leitungsmodell bzw. Modell R-2 zu mehr verfälschten Ergebnissen führen und somit versagen. Deshalb soll auch nach einem Kriterium gesucht werden, ab wann es sinnvoll ist, das neu entwickelte Leitungsmodell einzusetzen.

Abbildung 4-28 zeigt eine gezoomte Darstellung eines einpoligen Kurzschlusses einer langen Leitung aus (Abbildung 4-21). Es stellt einen Vergleich zwischen dem aktuellen und dem neu entwickelten Leitungsmodell dar.

Es ist zu erkennen, wie beim aktuellen Leitungsmodell die Spannung schon kurz nach Fehlereintritt (105ms) und somit zu früh einbricht (großer Kreis). Das kann aber nicht sein, da kein Signal sich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann. Auch entstehen durch die Begrenzung der  $\Gamma$ -Segmente unerwünschte Oszillationen und der Signalverlauf kann nicht realistisch wiedergegeben werden. Auch beim neu entwickelten Leitungsmodell bricht die Spannung etwas zu früh ein. Das ist auf die niedrige Abtastrate und des daraus resultierenden Interpolationsfehlers zurückzuführen.

Das neu entwickelte Leitungsmodell kann den Signalverlauf des Referenzmodells sehr gut wiedergeben. Es ist aber zu erkennen, dass die hohen Spitzen des Referenzmodells nicht erreicht werden können (kleine Kreise). Auch hier entsteht der Fehler durch die Verwendung der niedrigen Abtastrate und des entstehenden Interpolationsfehlers, wodurch es nicht möglich ist, den Signalverlauf ganz korrekt wiederzugeben.

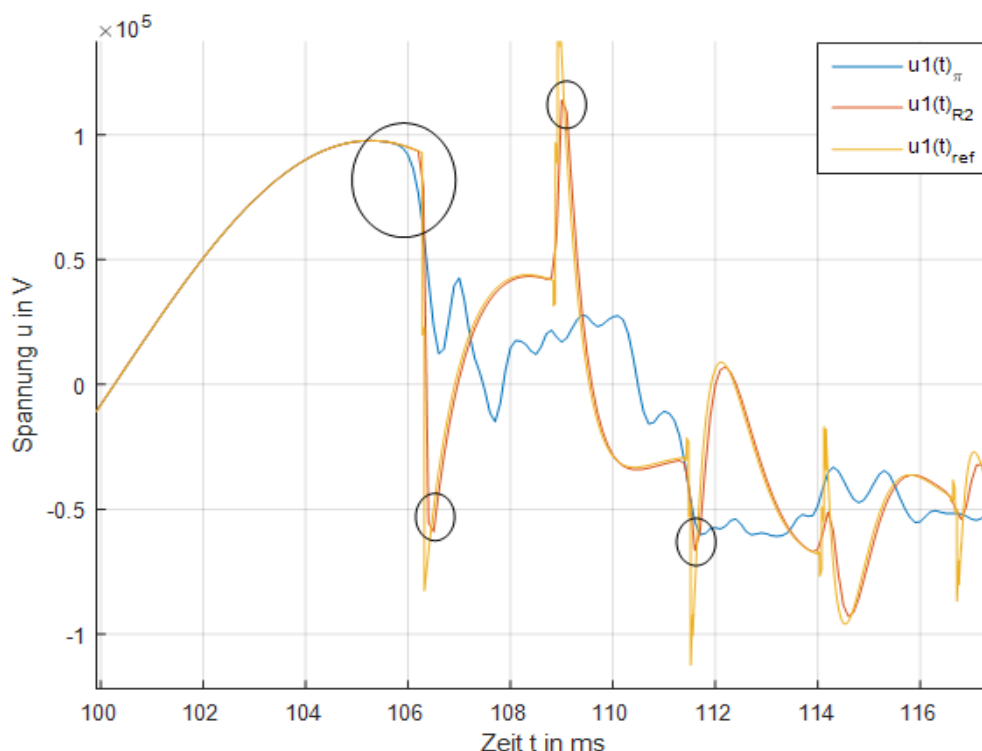


Abbildung 4-28 Gezoomte Darstellung eines einpoligen Kurzschlusses (Abbildung 4-21)

## 4.2.2 Vergleich der numerischen Rechenmethoden anhand des Modells R-2

Es soll nun ein Vergleich mit Matlab/Simulink gemacht werden, um zu überprüfen ob das neu entwickelte Leitungsmodell richtig modelliert wurde. Im Weiteren wird nur mehr auf das Leitungsmodell R-2 (Kapitel 4.1.2.3) Bezug genommen, da dieses am einfachsten zu implementieren ist und von einem verzerrungsfreien Leitungsmodell abgesehen wird. Gezeigt werden soll jeweils eine Simulationsbeispiel aus Kapitel 4.2.1.1 bzw. Kapitel 4.2.1.2.

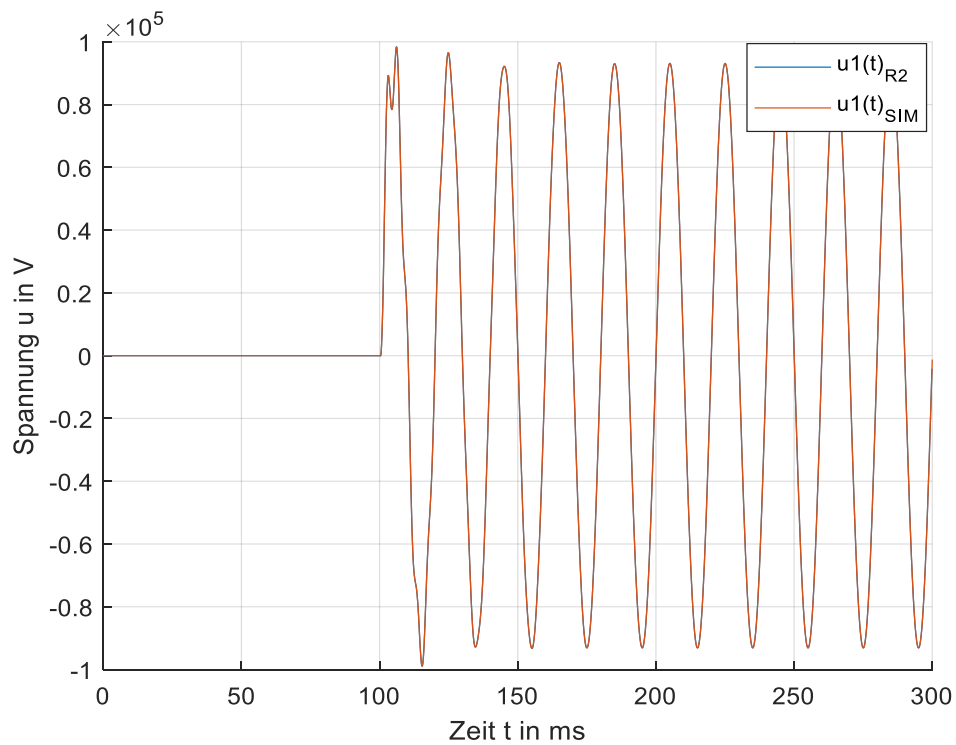


Abbildung 4-29 Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung – Vergleich der Spannung von Phase 1

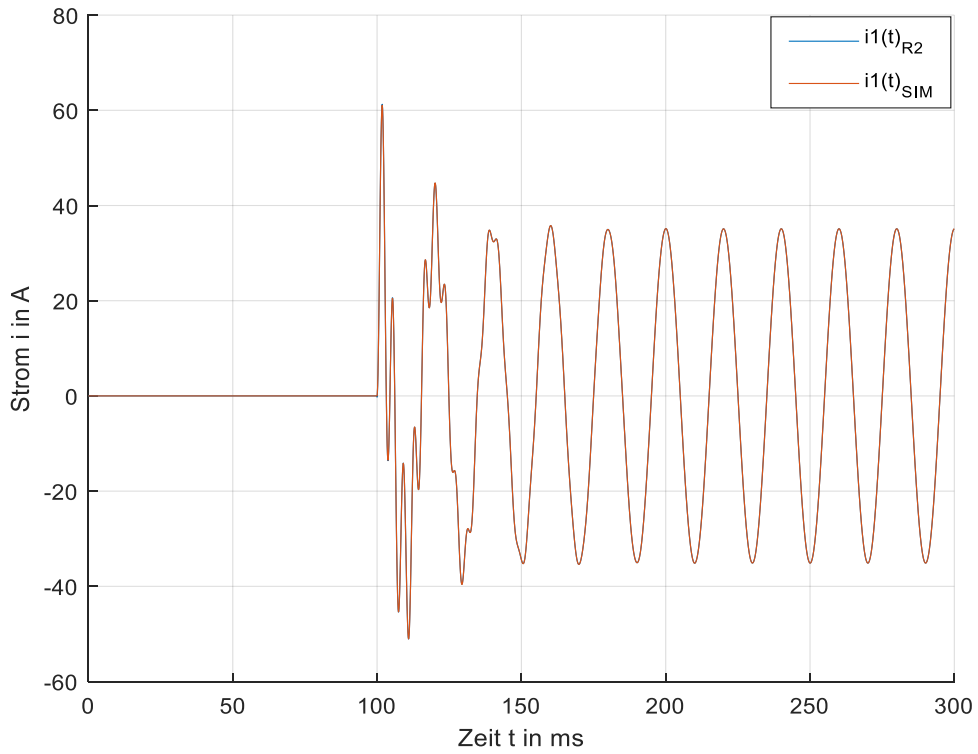


Abbildung 4-30 Zuschaltung einer dreiphasigen Leitung – Vergleich des Stromes von Phase 1

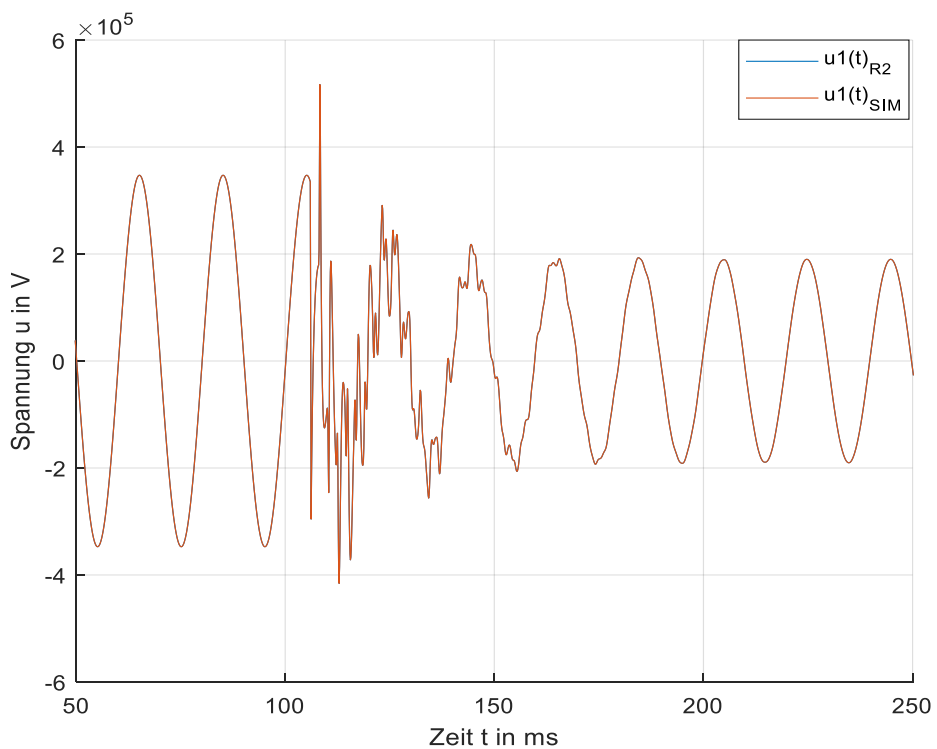


Abbildung 4-31 Einpoliger Kurzschluss – Vergleich der Spannung von Phase 1

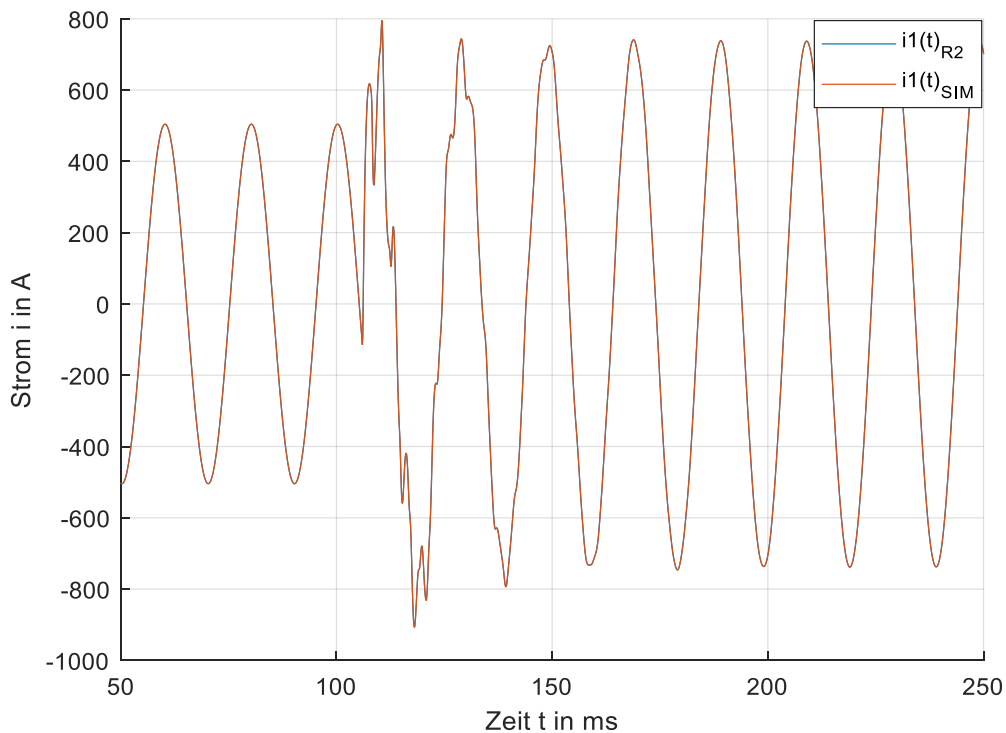


Abbildung 4-32 Einpoliger Kurzschluss – Vergleich des Stromes von Phase 1

Grundsätzlich ist zu sagen, dass das neu entwickelte Leitungsmodell mit der Referenzsoftware Matlab/Simulink eine sehr hohe Übereinstimmung zeigt. Es ist davon auszugehen, dass das neu entwickelte Leitungsmodell korrekt modelliert wurde.

Bei zu kurzen Leitungslängen versagt dieses Leitungsmodell (Abbildung 4-25 - Abbildung 4-27). Das ist darauf zurückzuführen, dass die Abtastrate bei 10kHz begrenzt ist und somit ein Fehler in der Berechnung entsteht, der wiederum zu einem falschen Ergebnis führt. Bei höheren Abtastraten (> 1MHz) würde dieses Leitungsmodell trotzdem funktionieren, da die Interpolation in diesem Falle keinen Fehler verursacht.

Somit soll ein Kriterium gefunden werden, ab wann es sinnvoll ist das neu entwickelte Leitungsmodell bzw das aktuelle Leitungsmodell einzusetzen. Dabei kann auf eine einfache Lösung zurückgegriffen werden:

$$\text{Laufzeit der Wanderwelle [ T ]} < \text{Abtastrate [ } \Delta t \text{ ]}$$

Mit Hilfe dieser Bedingung kann ganz einfach festgestellt werden, welches Leitungsmodell verwendet werden soll. Ist die Laufzeit kleiner als die Abtastrate wird das aktuelle Leitungsmodell beibehalten. Liegt die Laufzeit über der Abtastrate ist das neu entwickelte Leitungsmodell zu bevorzugen und einzusetzen.

## 5 Prüfung eines Leitungsschutzes mit Wanderwellenerkennung

Die neuesten Schutzrelais nutzen Wanderwellen basierende Elemente, um einen extrem schnellen Leitungsschutz zu realisieren. Dies stellt die Prüfung des Schutzes vor neue Herausforderungen. Einfaches Einspeisen von stationären Strömen und Spannungen reicht nicht, um diese Elemente auszulösen. Wanderwellen sind Signale mit sehr hohen Frequenzen und es muss eine Simulation mit sehr hohen Abtastraten (größer als 1MHz) durchgeführt werden. [22, 23]

### 5.1 Einführung in ein Schutzrelais mit Wanderwellenerkennung

Eine Wanderwelle ist ein elektromagnetisches Phänomen, dass durch eine plötzliche Änderung im System entsteht. Dabei wird eine Wanderwelle für die Spannung und eine Wanderwelle für den Strom erzeugt. Im Falle eines Leitungsfehlers bewirkt der Spannungsabfall bzw. die Stromerhöhung auf der Leitung, dass sich die Wanderwelle vom Fehlerort weg ausbreitet. Auf einer Freileitung breitet sich diese Wanderwelle fast mit Lichtgeschwindigkeit aus, was es zum allerersten Phänomen macht, das an den Klemmen gemessen werden kann.

Das Schutzrelais mit Wanderwellenerkennung versucht daher, die durch einen Fehler verursachte Wanderwelle zu erkennen. Um eine Wanderwelle erkennen zu können, erfasst das Schutzrelais die charakteristische steile Kante bzw. die niedrige Ansteigszeit einer Wanderwelle. Um die steile Kante zu ermitteln, muss das Schutzrelais Spannungen und Ströme mit einer sehr hohen Abtastrate messen.



Abbildung 5-1 Schutzrelais mit Wanderwellenerkennung der Firma SEL [23]



Abbildung 5-2 Schutzrelais - Wanderwellen Elemente TW32 bzw. TW87

In Abbildung 5-1 sieht man ein Schutzrelais mit Wanderwellenerkennung der Firma SEL des Typs SEL-T400L. TW32 bzw. TW87. In .Abbildung 5-2 sind die Elemente des Schutzrelais ersichtlich, die auf Wanderwellenerkennung basieren. Diese Elemente sollen näher erläutert werden.

**TW32 Element:**

Das TW 32 Element reagiert auf die erste erzeugte Wanderwelle von Strom bzw. Spannung in der Leitung. Das Element ist sehr schnell und empfindlich, aber nicht zu 100 Prozent zuverlässig. Würde ein Fehler nahe des Nulldurchganges der Spannung auftreten, würde keine Wanderwelle mit ausreichender Größe erzeugt werden. Deshalb wird das TW32 Element nur in Verbindung mit dem TD32 Element eingesetzt.

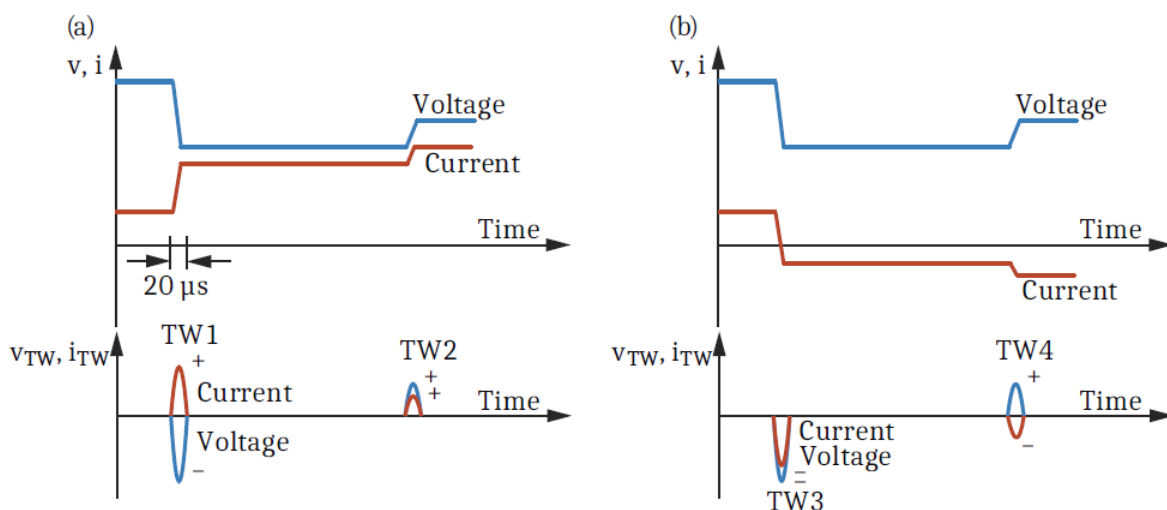


Abbildung 5-3 TW32 Funktionsprinzip: (a) Fehler in Vorwärtsrichtung, (b) Fehler in Rückwärtsrichtung [23]

Abbildung 5-3 soll das Funktionsprinzip des TW32 Elementes näher erläutern. Ein Fehler in der geschützten Leitung erzeugt Wanderwellen für Spannung bzw. Strom in Richtung des Schutzrelais. Die Schutz-Stromwandler messen die Wanderwelle für die Ströme in Vorwärtsrichtung, was bedeutet, dass Spannung und Strom entgegengesetzte Polaritäten (TW1) aufweisen, wie in Abbildung 5-3 (a) ersichtlich. Wäre der Fehler außerhalb der geschützten Leitung, würden die Schutz-Stromwandler der Schutzrelais die Ströme in umgekehrter Richtung messen. Dies würde bedeuten, dass Spannung und Strom nun dieselbe Polarität besitzen (TW3), wie in Abbildung 5-3 (b) ersichtlich.

Die Polaritäten der erste Wanderwelle für Strom bzw. Spannung geben die Fehlerrichtung an und zeigen, ob sich der Fehler auf der geschützten oder außerhalb der geschützten Leitung befindet. Wanderwellen, die der ersten Wanderwelle folgen, können unabhängig von der Fehlerrichtung, aufgrund von Reflexionen von Diskontinuitäten, auftreten (TW2 bzw. TW4).

**TW87 Element:**

Das TW87 Element ist ein Wanderwellendifferentialschutz und basiert auf die erste eingetroffene Wanderwelle. Es bietet ultraschnellen und empfindlichen Leitungsschutz. Die Schutzrelais sind mit einem Glasfaserkanal verbunden.

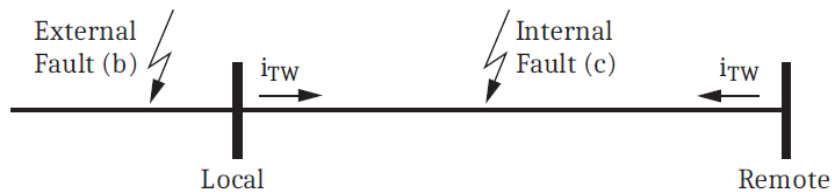


Abbildung 5-4 TW87 Funktionsprinzip: Fehlerorte [23]

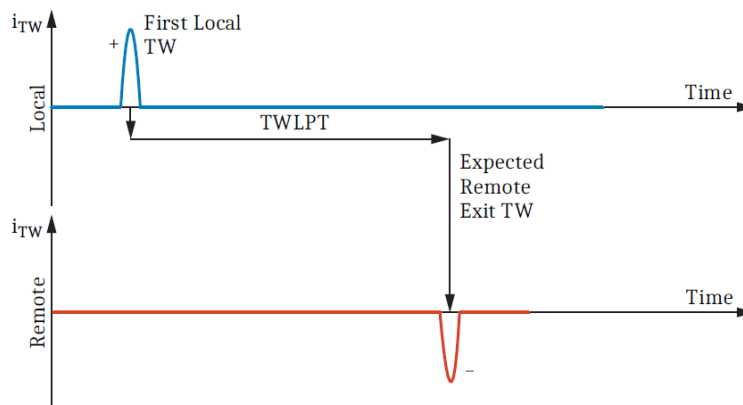


Abbildung 5-5 TW Funktionsprinzip: Fehler außerhalb der geschützten Leitung (External Fault) [23]

Wie in Abbildung 5-4 gezeigt wird erzeugt ein Fehler außerhalb der geschützten Leitung (External Fault) eine Wanderwelle, die sich vom Fehlerort ausbreitet und zuerst das nächstgelegene Schutzrelais der geschützten Leitung erreicht (Local). Die Wanderwelle breitet sich entlang der geschützten Leitung weiter aus und erreicht nach der Zeit TWLPT das gegenüberliegende Schutzrelais (Remote). Im Fall

von Abbildung 5-5 ist die Zeitdifferenz genau TWLPT und somit ist es für das Schutzrelais klar, dass der Fehler außerhalb der Leitung liegen muss.

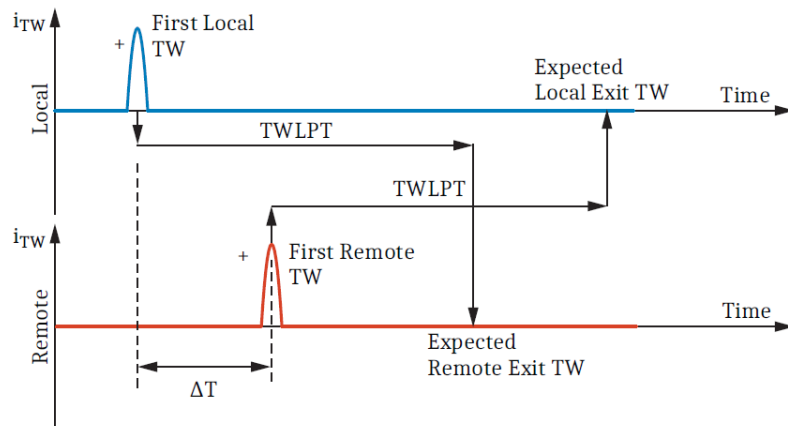


Abbildung 5-6 TW87 Funktionsprinzip: Fehler auf der geschützten Leitung (Internal Fault) [23]

Ein Fehler auf der geschützten Leitung (Internal Fault), wie in Abbildung 5-4 gezeigt, erzeugt wiederum eine Wanderwelle, die sich nun in Richtung der Schutzrelais ausbreitet. Da die Zeitdifferenz kleiner TWLPT ist, wissen die Schutzrelais, dass der Fehler innerhalb der geschützten Leitung liegen muss. Ersichtlich ist dies in Abbildung 5-6.

Das TD32 Element bzw. TD21 Element basieren auf sogenannten Delta-Größen und sind für nähere Informationen in [23] beschrieben.



**Prinzip der Fehlerortung:**

Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Wanderwelle entlang der Leitung leicht und mit hoher Genauigkeit ermittelt werden kann, kann ein Schutzrelais mit Wanderwellenerkennung auch den Fehlerort mit hoher Genauigkeit berechnen. Zur Berechnung des Fehlerortes können zwei Prinzipien verwendet werden.

**Single-Ended Prinzip:**

Dieses Prinzip basiert auf der Tatsache, dass wenn sich der Wellenwiderstand der Leitung ändert, die Wanderwelle reflektiert wird. Abbildung 5-7 soll das verdeutlichen.

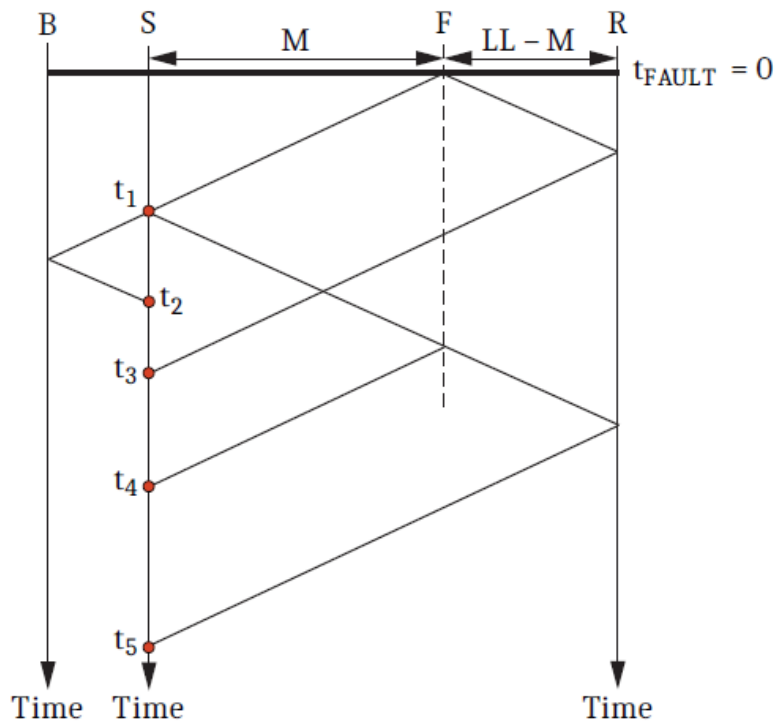


Abbildung 5-7 Bewley-Diagramm zur Ermittlung der Fehlerortung mit Single-Ended Prinzip [23]

Bei einem Leitungsfehler F kommt die Wanderwelle am Leitungsanschluss S, wo sich auch das Schutzrelais befindet, an, wird reflektiert und wandert zum Fehlerort zurück, wo wiederum eine Reflexion stattfindet. Folgende Gleichung kann für die Ermittlung des Fehlerortes angegeben werden:

$$M = \frac{(t_4 - t_1)}{2 * \tau} * LL \quad (5-1)$$

Double-Ended Prinzip:

Für dieses Prinzip werden zwei Schutzrelais mit Wanderwellenerkennung verwendet und benötigen keine Reflexion der Wanderwelle, wie in Abbildung 5-8 ersichtlich.

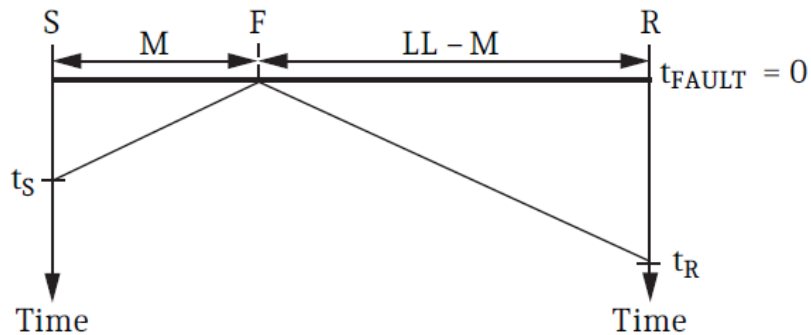


Abbildung 5-8 Bewley-Diagramm zur Ermittlung der Fehlerortung mit Double-Ended Prinzip [23]

Bei einem Leitungsfehler F kommt die Wanderwelle am Leitungsanschluss S und R, wo sich auch die Schutzrelais befinden, an. Durch Ermittlung der beiden Laufzeiten  $t_s$  und  $t_R$  der Wanderwelle lässt sich der Fehlerort wie folgt berechnen:

$$M = \frac{LL}{2} \left( 1 + \frac{t_s - t_R}{\tau} \right) \quad (5-2)$$

## 5.2 Messaufbau

Für die Überprüfung des neu implementierten Leitungsmodells R-2 (Kapitel 4.1.2.3) soll folgende Leitungskonfiguration untersucht werden.

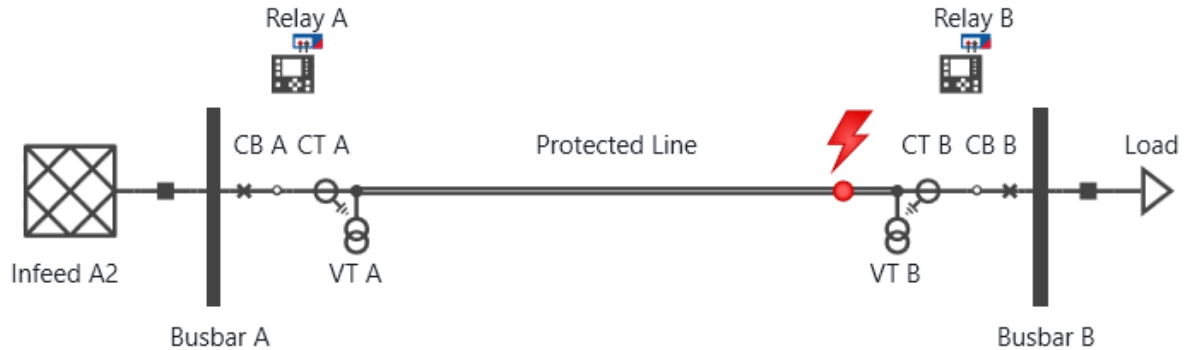


Abbildung 5-9 Schaltungsaufbau für das neu implementierte Leitungsmodell R-2

Es soll ein einpoliger Kurzschluss einer dreiphasigen Leitung, welches das neu implementierte Leitungsmodell darstellt, untersucht werden. Der Fehlerort befindet sich bei 90 Prozent der Leitungslänge. Tabelle 5-1 zeigt die verwendeten Eingangsparameter. Die Impedanzen sind in symmetrischen Komponenten dargestellt.

Eingangsparameter der geschützten Leitung									
Nennspannung	Nennstrom	Leitungslänge	R1'	R0'	X1'	X0'	C1'	C0'	T
[kV]	[kA]	[km]	[mΩ/km]	[mΩ/km]	[mΩ/km]	[Ω/km]	[μF/km]	[μF/km]	[μs]
230	1	100	81,530	775,73	366,57	2,4528	0,0098	0,0030	340

Tabelle 5-1 Eingangsparameter für die Schutzprüfung des neu implementierten Leitungsmodells

Geschützt wird die Leitung von zwei Schutzrelais vom Typ SEL-T400L. Mit dieser Schutzprüfung soll festgestellt werden, ob das neu entwickelte Leitungsmodell ordnungsgemäß arbeitet und die Schutzrelais dementsprechend richtig auslösen können.

Abbildung 5-10 zeigt eine Darstellung des Messaufbaus für die Schutzprüfung des neu entwickelten Leitungsmodells mit den Schutzrelais SEL-T400L. Die Messung wurde unter Laborbedingungen durchgeführt.

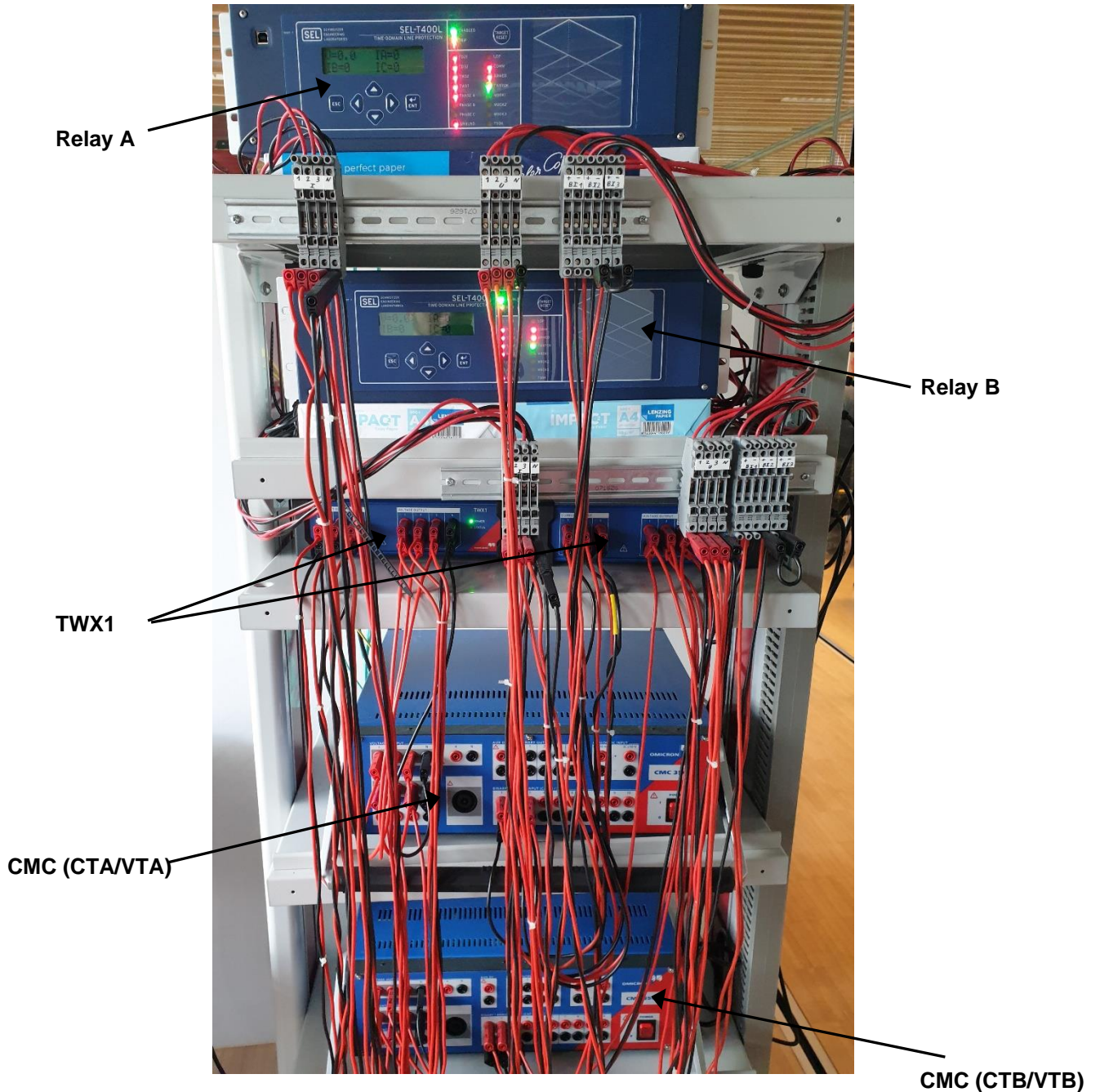


Abbildung 5-10 Verkabelung des Schaltungsaufbaus für die Schutzprüfung

Das Hardware Setup besteht aus folgenden Komponenten:

- 2 CMC 3 phasige Schutzprüfgeräte
- 2 TWX1 Wanderwellenpulsgeneratoren
- Zeitsynchronisierung der CMCs über GPS
- Lokaler PC
- 2 Schutzrelais der Type SEL-T400L

Die zwei CMCs simulieren jeweils Spannungswandler (VTA bzw. VTB) bzw. Stromwandler (CTA bzw. CTB) der Leitung. Da die CMCs aufgrund ihrer Leistung auf eine Bandbreite von 3,5kHz begrenzt sind, ist dies für die Auslösung der Schutzrelais nicht ausreichend. Daher wird mit Hilfe des TWX1 ein Wanderwellenimpuls überlagert. TWX1 beinhaltet eine Reihenschaltung von Kondensatoren, die zu einem bestimmten Zeitpunkt entladen werden. Dadurch kann eine steile Flanke im Signal erzeugt werden, welche nur mittels einer Abtastrate von größer 1 MHz erfasst werden kann, damit das Schutzrelais auslöst.

Die Schutzrelais sind für die Kommunikation über einen Glasfaserkanal miteinander verbunden. Für die Zeitsynchronisation der CMCs wird das globale Positionsbestimmungssystem (GPS) verwendet, da normalerweise bei Prüfungen die CMCs sich im großen Abstand zueinander befinden. Die Genauigkeit der Zeitsynchronisation ist essentiell, da schon 1  $\mu$ s eine Fehlerortsabweichung von ca. 300 m bedeuten würde.

### 5.3 Messergebnisse

In diesem Kapitel soll aufgezeigt werden, welchen Einfluss das neu entwickelte Leitungsmodell in den Messergebnissen hat. In den folgenden Abbildungen wurde jeweils die gleiche Messung durchgeführt. Es wurden dazu unterschiedlich komplexe Leitungsmodelle verwendet, um graphisch zu zeigen, welches Leitungsmodell physikalisch korrekt die Ausbreitungszeit der Wanderwelle beinhaltet und zu richtigen Simulationsergebnissen führt.

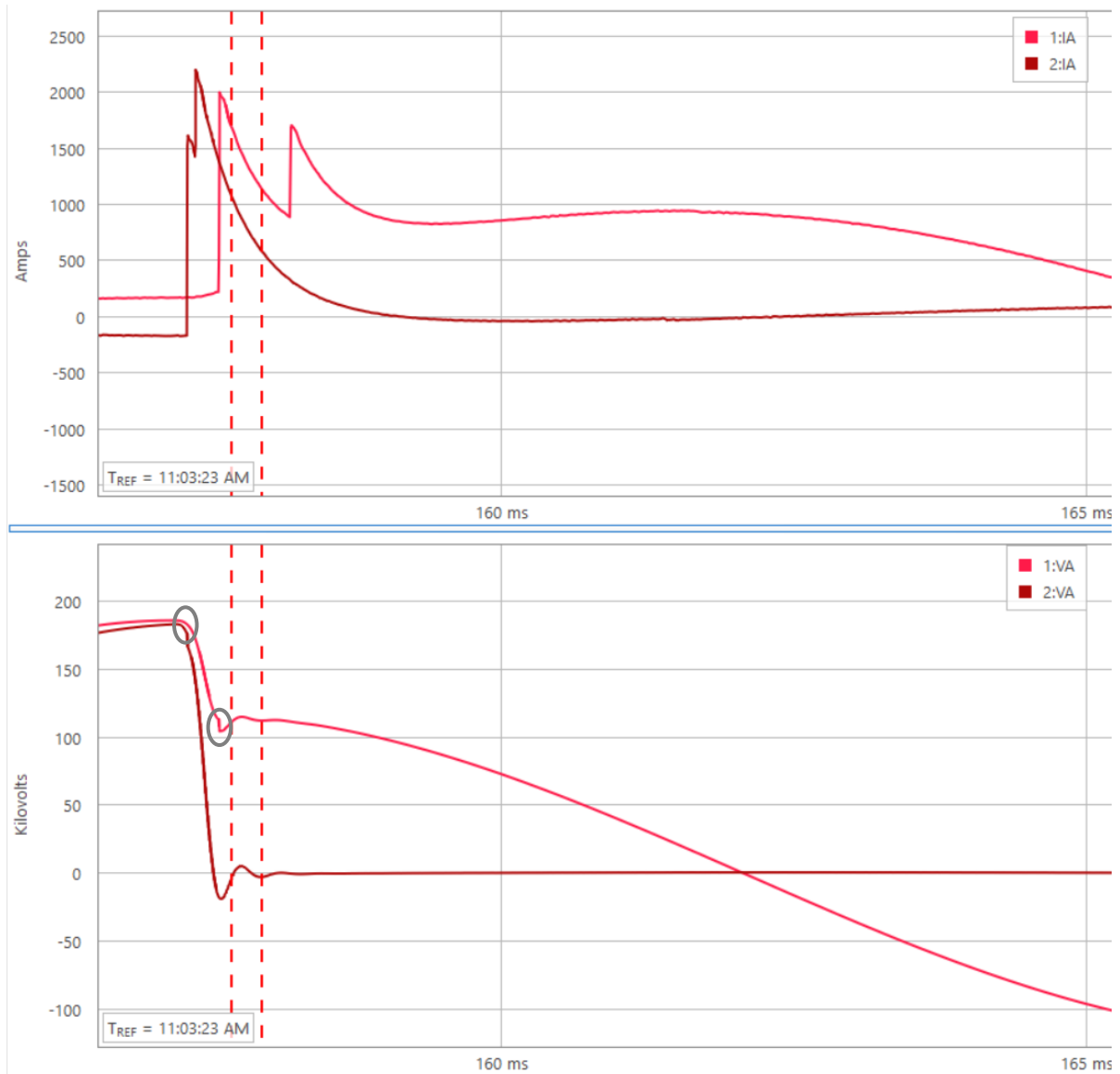


Abbildung 5-11 Leitungsmodell mit einem einzigen R-L-Element

Abbildung 5-11 beinhaltet lediglich ein R-L Element zur Repräsentation einer 100 km langen Leitung. Das Szenario ist ein einpoliger Fehler bei 90 Prozent der Leitung. Am Relay B(2:VA) wird das Signal fast unverzögert detektiert werden, da die Wanderwelle nur eine Strecke von 10 km zurückzulegen hat. Da die Wanderwelle für eine 90 km lange Leitung zur Erreichung des Relay A(1:VA) eine gewisse Zeit

benötigt, dürfte sich erst nach idealerweise 306  $\mu\text{s}$  eine Änderung im Signal zeigen. Es ist aber deutlich zu erkennen, dass die Spannung 1:VA fast unverzögert, also im gleichen Moment wie 2:VA, einbricht. Die Spannung bricht ein, bevor der Impuls des TWX1 erfolgt, was zur Auslösung des Schutzrelais führt. Dieses Verhalten ist aber nicht realistisch und es könnten andere Elemente der Schutzkette dadurch gestört werden. In Zukunft könnte es Schutzrelais geben, die das nicht mehr akzeptieren. Deshalb sollte dieses Leitungsmodell nicht angewendet werden. Außerdem kommt es in diesem Leitungsmodell, aufgrund der fehlenden Kapazitäten zu fast keinen elektromagnetischen Ausgleichsvorgängen.

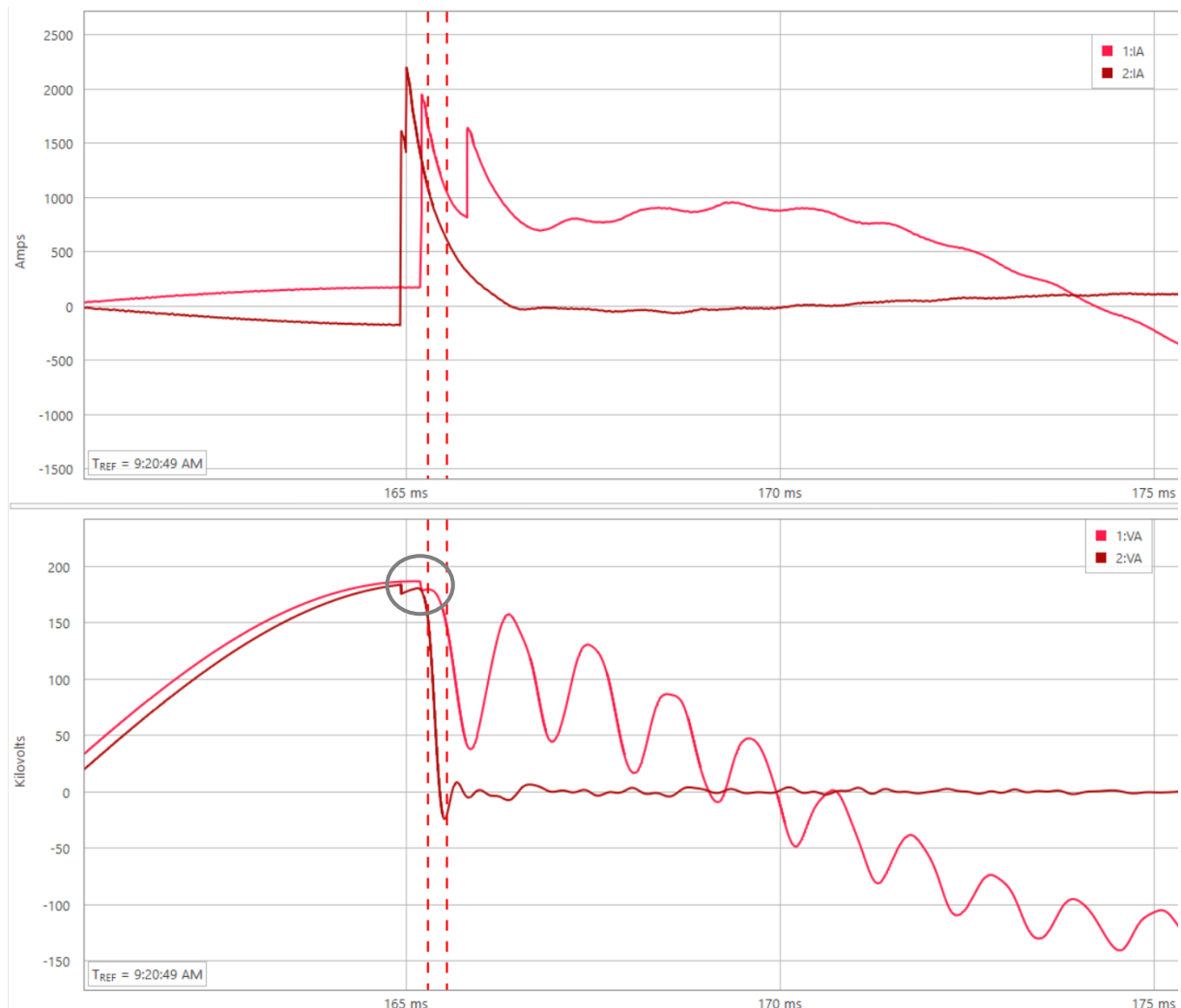


Abbildung 5-12 Aktuelles Leitungsmodell (Kapitel 3)

Abbildung 2-1Abbildung 5-12 beinhaltet das Recording des aktuellen Leitungsmodells (konzentrierte Elemente, 17 Segmente, Kapitel 3). Um nun zu verhindern, dass der Wanderwellenimpuls wie in Abbildung 5-11 erst spät nach Einbruch der Spannung erfolgt, wird versucht, den Wanderwellenimpuls zu verschieben. Damit ist gemeint, dass der TWX1 den Wanderwellenimpuls nach dem ersten Sample nach dem Fehlereintritt erzeugt. Das verursacht aber, dass der Wanderwellenimpuls schon erzeugt wird, bevor der Fehler am Relay A und Relay B detektiert werden kann. Es kommt dadurch zu keinen

Störungen bei der Auslösung der Schutzrelais, aber der Signalverlauf ist nicht korrekt, weil keine Ausbreitungszeit der elektromagnetischen Welle berücksichtigt wird.

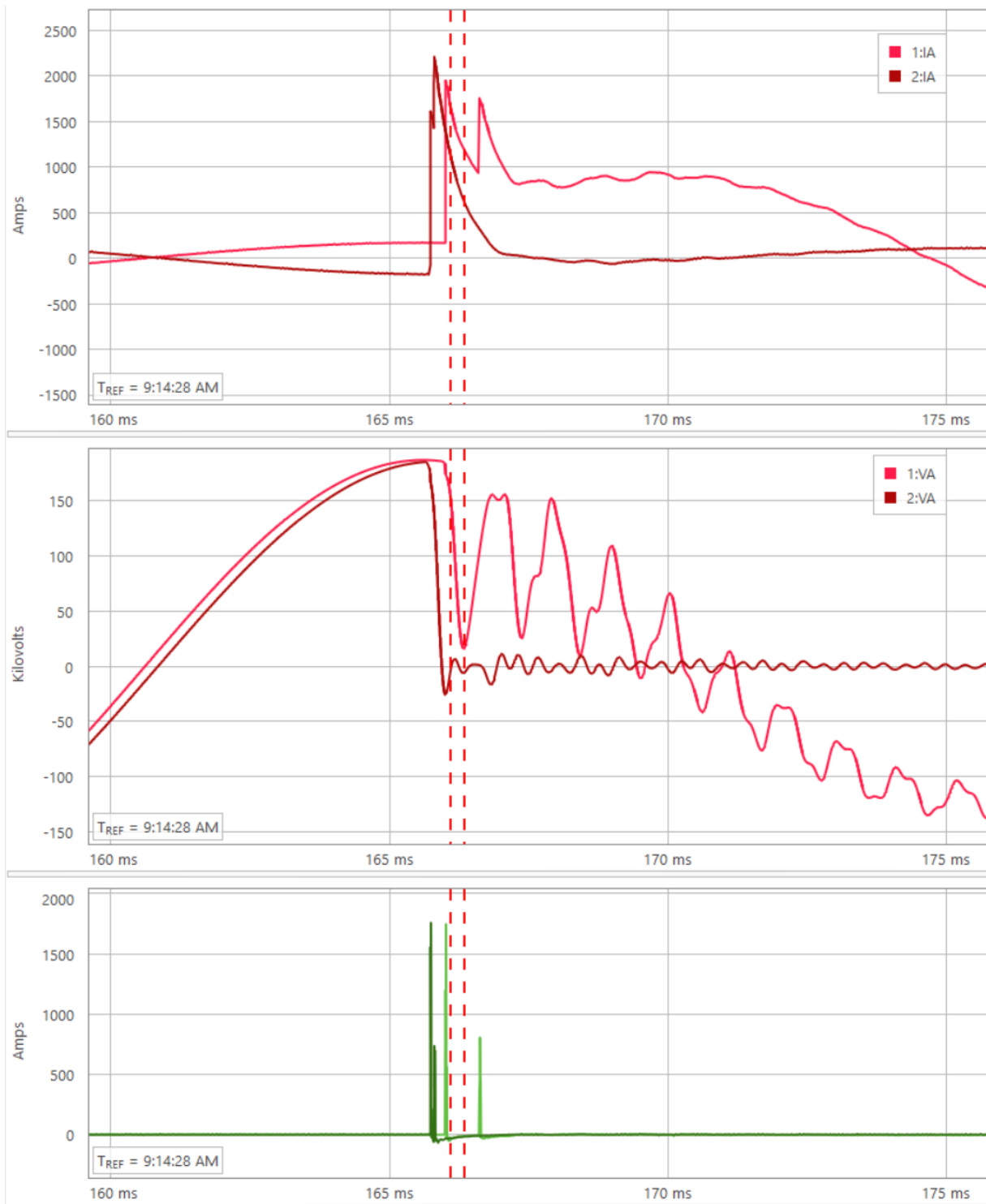


Abbildung 5-13 Leitungsmodell R-2 mit Berücksichtigung der Laufzeit der Wanderwelle

Abbildung 5-13 beinhaltet das Recording für das neue entwickelte Leitungsmodell R-2. Mit Hilfe dieses mathematischen Modells erkennt man, dass die Ausbreitungszeit der elektromagnetischen Welle



berücksichtigt wird. Die Erzeugung des Wanderwellenimpulses und das Einbrechen der Spannung stimmen überein. Es kommt lediglich zu einer kleinen Unstimmigkeit, da die geringe Abtastrate einen Interpolationsfehler verursacht, wie man bei 1:VA bzw. 2:VA durch ein leicht verfrühtes Einbrechen der Spannung erkennen kann. Bei genügend hoher Abtastrate würde der Interpolationsfehler keine Auswirkungen haben.

Im untersten Bild (grünes Signal) von Abbildung 5-13 wird das differenzierte Stromsignal (1:IA bzw. 2:IA) dargestellt. Dazu wird ein Differentiator verwendet, um über die Flanken des Stromsignals die hochfrequente Wanderwelle einzumessen und dadurch den Zeitpunkt des Eintreffens der Wanderwelle zu ermitteln.

Mit Hilfe der Schutzrelais mit Wanderwellenerkennung ist es auch möglich, auf präziseste Weise den Fehlerort zu bestimmen, welches aber wiederum von der präzisen Zeitsynchronisation der beiden CMCs abhängt. Bei Anwendung der Fehlerortung mittels Wanderwellen entsteht eine Abweichung zum Fehlerort von nur 3 m bei einer Leitungslänge von 100 km. Mit der herkömmlichen Impedanzmessung entsteht hier eine Abweichung von über 200 m, was ungefähr einem Mastabstand entspricht.

Dies zeigt, welche erstaunlich genauen Fehlerortungen diese neue Technologie durch Ausnutzung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen ermöglichen.

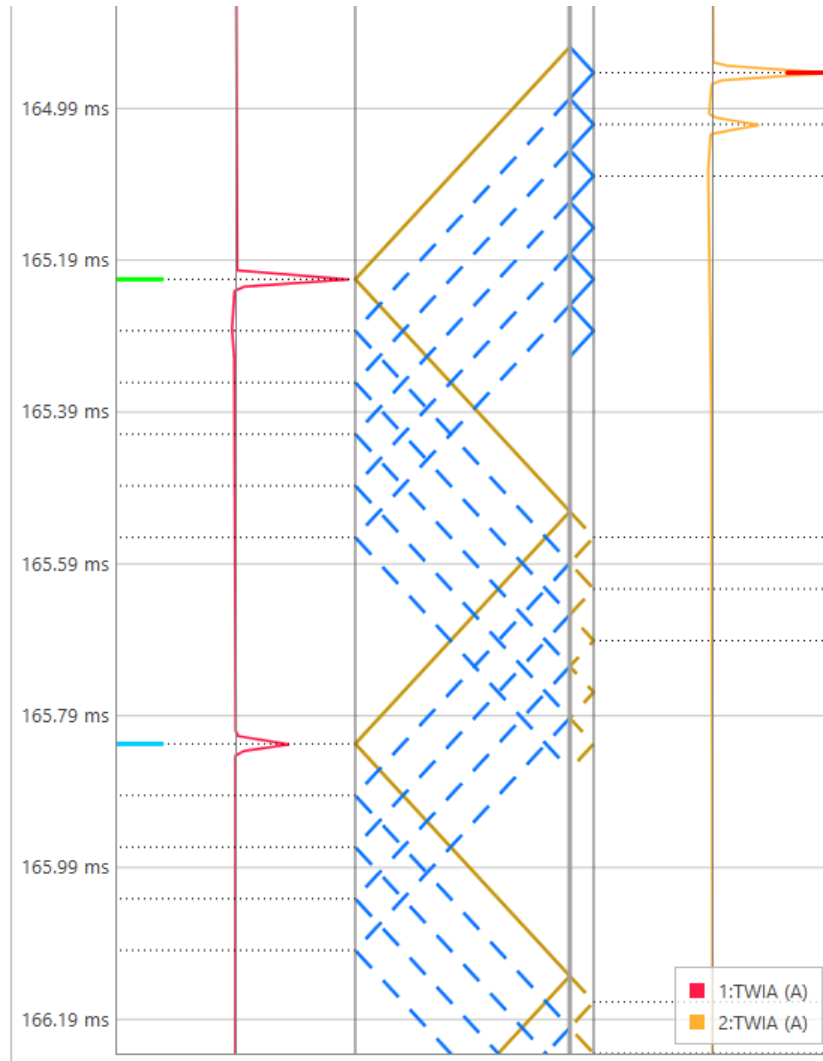


Abbildung 5-14 Bewley Diagramm - graphische Darstellung der Fehlerortermittlung (Single-Ended bzw Double-Ended)

**Fehlerortung Relay A:**

[Fault\_Location]  
 SE\_TW\_Location1, "90.042(km)"  
 SE\_TW\_Location2, "\$\$\$\$\$\$(km)"  
 SE\_TW\_Location3, "\$\$\$\$\$\$(km)"  
 SE\_TW\_Location4, "\$\$\$\$\$\$(km)"  
 DE\_TW\_Location, "89.997(km)"  
 SE\_Z-Based\_Location, "90.081(km)"  
 DE\_Z-Based\_Location, "89.834(km)"  
 First\_TW\_Time\_Local, "2020/03/05,08:14:28.166010691"  
 First\_TW\_Time\_Remote, "2020/03/05,08:14:28.165738710"

Fehlerortung mittels Wanderwellen

Fehlerortung mittels herkömmlicher Impedanzmessung

**Fehlerortung Relay B:**

[Fault\_Location]

SE\_TW\_Location1,"10.050(km)"

SE\_TW\_Location2,"\$\$\$\$\$(km)"

SE\_TW\_Location3,"\$\$\$\$\$(km)"

SE\_TW\_Location4,"\$\$\$\$\$(km)"

DE\_TW\_Location,"10.003(km)"

SE\_Z-Based\_Location,"10.267(km)"

DE\_Z-Based\_Location,"10.254(km)"

First\_TW\_Time\_Local,"2020/03/05,08:14:28.165738710"

First\_TW\_Time\_Remote,"2020/03/05,08:14:28.166010691"

Fehlerortung mittels Wanderwellen

Fehlerortung mittels herkömmlicher  
Impedanzmessung

## 6 Diskussion

Um das reale Verhalten auch von langen Übertragungsleitungen physikalisch korrekt nachzubilden zu können weisen Leitungsmodelle für transiente Vorgänge wie zum Beispiel Schalthandlungen oder Blitzeinschläge eine hohe Komplexität auf, da sie neben der Zeitabhängigkeit auch die Ortsabhängigkeit der Zustandsgrößen (Ströme und Spannungen) darstellen müssen.

Das herkömmliche Leitungsmodell basiert auf konzentrierten Parametern. Hierbei handelt es sich um eine Anordnung in Form von mehreren in Reihe geschalteten  $\Gamma$ -Segmenten. Diese  $\Gamma$ -Segmente bestehen aus passiven Elementen (Widerstand, Induktivität, Kapazität, Leitwert). Aufgrund der Vernachlässigung der Ortsabhängigkeit der Zustandsgrößen liefert dieses Leitungsmodell nicht ausreichend genaue Ergebnisse, was sich vor allem bei langen Übertragungsleitungen bemerkbar macht.

Die neu entwickelte Methode zur Modellierung von Übertragungsleitungen berücksichtigt diese Ortsabhängigkeit der Zustandsgrößen, indem verteilte Leitungsparameter angenommen werden. Das bedeutet, dass Spannung und Strom zu jedem Zeitpunkt und Ort mit hoher Genauigkeit dargestellt werden können. Dazu wurde eine mathematische Herangehensweise gewählt, welche auf die Maxwell'sche Telegraphengleichung zurückzuführen ist. Dadurch wird die Ausbreitungszeit der elektromagnetischen Welle berücksichtigt, was dem realen Verhalten einer Übertragungsleitung entspricht.

Durch die Art der Modellierung entstehen auch weitaus weniger Knotenpunkte auf der Leitung. Die zu berechnenden Matrizen können dadurch klein gehalten werden, was sich zusätzlich positiv auf den Berechnungsaufwand auswirkt. Vor allem bei langen Übertragungsleitungen überwiegen die Vorteile des neu entwickelten Leitungsmodells, da das Simulationsverhalten eine hohe Genauigkeit aufweist. Das herkömmliche Leitungsmodell versagt hier, da aufgrund der Begrenzung der  $\Gamma$ -Segmente es zu unerwünschten numerischen Oszillationen kommt und somit kein korrektes Simulationsverhalten mehr möglich ist.

Aufgrund der begrenzten Bandbreite des Verstärkers für die Schutzsystemprüfung ist es unmöglich, im Ausgangssignal der Simulation die Spannungs- und Stromspitzen beizubehalten, die durch die hochfrequenten elektromagnetischen Wellen erzeugt werden, aber für den Algorithmus des Schutzrelais benötigt werden. Durch die niedrige Abtastfrequenz wird im Leitungsmodell ein Interpolationsfehler verursacht, was zu Verfälschungen im Signal führen kann. Im Prinzip kann die Simulation mit jeder Abtastrate durchgeführt werden, dadurch könnte auch der Interpolationsfehler verringert werden. In Zukunft könnte es ausreichende Verstärker geben, womit mit diesem entwickelten Leitungsmodell das Gerät zur Erzeugung der hochfrequenten Impulse eingespart werden könnte.

Abschließend wird ein Anwendungsbeispiel basierend auf einer transienten Simulation für eine Schutzsystemprüfung gezeigt. Es konnte eine erfolgreiche Prüfung des Differentialleitungsschutzes durch Anwendung des neu entwickelten Leitungsmodells durchgeführt werden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das neu implementierte Leitungsmodell und die Lösungsmethoden für simulationsbasierte Prüfungen im Zeitbereich geeignet sind.

Die Arbeit leistet einen Beitrag zur Entwicklung eines auf verteilten Parametern basierenden Leitungsmodells. Mit Hilfe dieses Modells können unterschiedliche transiente Betriebszustände mit hoher Genauigkeit simuliert werden. Dieses Leitungsmodell kann als Grundlage verwendet werden, in zukünftige Arbeiten auf ein Leitungsmodell mit verteilten und frequenzabhängigen Parametern zu erweitern.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] H. W. Dommel: EMTP Theory Book, Portland, Oregon: Boneville Power Administration, 1994
- [2] Canadian / American EMTP User Group: Alternative Transients Program Rule Book, Oregon, 1995
- [3] MicroTran Power System Analysis Corp.: Transients Analysis Program for Power and Power Electronic Circuits, Reference Manual, British Columbia, Canada, 2002
- [4] Manitoba HVDC Center: PSCAD/EMTDC User's Manual - Version 4.6.0: Winnipeg, Canada: Manitoba HVDC Center, 2018
- [5] J. Mahseredjian and C. Dewhurst: EMTP-RV User Manual Version 4.0, 2018
- [6] Huanfeng Zhao, Aniruddha M. Gole: „Equivalency of State Space Models and EMT Companion Circuit Models: International Conference on Power Systems Transients, Perpignan, 2019“
- [7] H. W. Dommel: „Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems“, Vol. 1969, no.4
- [8] L.F.R. Ferreira, B.D. Bonatto, J.R. Cogo, N.C. de Jesus. H.W. Dommel and J.R. Mari: „Comparative Solutions of Numerical Oscillations in the Trapezoidal Method used by EMTP-based Programs: IEEE, International Conference on Power Systems Transients in Cavtat, Croatia“, Vol. 2015
- [9] T. Funaki et al.: „A study on the usage of CDA in EMTP simulations“, Vol.1, 2020
- [10] V. Crastan: „Elektrische Energieversorgung“, Springer, Berlin, 4. Auflage, 2015
- [11] D. Oeding, B. Oswald: „Elektrische Kraftwerke und Netze“, Springer, Heidelberg, 7. Auflage, 2011
- [12] R. Marenbach, D. Nelles, C. Tuttas: „Elektrische Energietechnik: Grundlagen, Energieversorgung, Antriebe und Leistungselektronik ; mit 8 Tabellen“, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2. Auflage, 2013
- [13] C. Bolognesi: Leitungen und Filter. Vorlesung 5. Semester D-ITET(Fachnr. 227-0112-00: Zürich, 2010 URL [http://people.ee.ethz.ch/~martidi/L+F\\_Skript\\_10.pdf](http://people.ee.ethz.ch/~martidi/L+F_Skript_10.pdf) – Überprüfungsdatum 2018-07-14, Zürich, 2010 URL [http://people.ee.ethz.ch/~martidi/L+F\\_Skript\\_10.pdf](http://people.ee.ethz.ch/~martidi/L+F_Skript_10.pdf) - Überprüfungsdatum 2018-07-14
- [14] A. Schwab, F. Imo: „Begriffswelt der Feldtheorie: Praxisnahe, anschauliche Einführung ; elektromagnetische Felder, Maxwellsche Gleichungen, Gradient, Rotation, Divergenz, Finite Elemente, Finite Differenzen, Ersatzladungsverfahren, Boundary-Element-Methode, Momentenmethode, Monte-Carlo-Verfahren“, Springer, Berlin, 5. Auflage, 1998
- [15] F.H. Branin, JR.: „Transient analysis of lossless transmission lines: Proc, IEEE, vol 55, pp. 2012-2013“, 1967
- [16] A. Hoshmeh: „<>“, Universitätsverlag Chemnitz, Chemnitz, 2018
- [17] A.-M. Miri: „Ausgleichsvorgänge in Elektroenergiesystemen: Mathematische Einführung, elektromagnetische und elektromechanische Vorgänge“, Springer, Berlin, 1. Auflage, 2013
- [18] Göran Andersson: Elektrische Energiesysteme Vorlesungsteil Energieübertragung: EEH - Power Systems Laboratory, ETH Zürich, EEH - Power Systems Laboratory, ETH Zürich, 2009

- [19] O. Junzhang, Z. Zhonghui: „The research of fault location of transmission line based on Bergeron model“, 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), 2010: 20-22 Aug. 2010, Chengdu, China ; *proceedings*, Chengdu, China, 2010
- [20] A. Schwab: „Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, Springer Berlin, Berlin, 2. Auflage, 2009
- [21] G. Balzer: „Schalt- und Ausgleichsvorgänge in elektrischen Netzen“, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1. Auflage, 2016
- [22] Christopher Pritchard, Heinz Lampl, Thomas Hensler: „Prüfen von Schutzgeräten nach dem Wanderwellen- und Delta-Größen Prinzip: Omicron electronics GmbH, Klaus, Austria“
- [23] SEL - Schweitzer Engineering Laboratories: SEL-T400L Ultra-High Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder: Instruction Manual, 20190430 Firmware R103-VO