Jan Meppelink 24/06/2003
Prof. Dr.-Ing. FHSW Soest

Abschlussbericht über das vom VDE ABB geförderte Projekt

Berechnung der Stromverteilung in einem Gebäude bei einem Folgeblitz 0,25/100µs

Danksagung

Der Verfasser dankt der Arbeitsgemeinschaft ABB für die finazielle Unterstützung in diesem Projekt durch Beteiligung an der Finanzierung einer Siemens Celsius 670 Workstation zur Berechnung der in diesem Bericht dargestellten Vorgänge. Die Berechnungen wurden mit Hilfe des Programms Microcap 7.0 Electronic Circuit Analysis Program von Spectrum Software, Sunnyvale California, www.spectrum-soft.de, durchgeführt.

Zusammenfassung

Diese Arbeit zeigt eine Einführung in die Modellierung von Blitzschutzsystemen bei Folgestoßstrom 0,25/100µs. Die Untersuchungen zeigen, dass eine Modellierung der Ableitungen durch Wanderwellenleitungen nicht erforderlich ist, da eine konzentrierte Induktivität für praktische Belange ausreichend genaue Ergebnisse liefert, siehe Bild 2. Der Erder muss hingegen mit einem Kettenleitermodell nachgebildet werden, da sich bei Folgestoßstrom erhebliche Unterschiede zeigen, so ist die Spannung am Erder bei Kettenleitermodellierung deutlich höher als bei konzentriertem Erdungswiderstand. Andere Systemkomponenten wie Zähler und Ableiter sind räumlich konzentriert und sind lediglich mit schnellen Modellen nachzubilden.
Die magnetische Kopplung von Blitzstromführenden Leitern in benachbarte Leiterschleifen ist bei Folgestoßstrom besonders wichtig. Im Falle von Ableitern, die in der Installation in einem galvanisch und magnetisch gekoppelten Kreis angeordnet sind, ist besonders darauf zu achten, dass die aufgespannte Fläche zwischen Blitzstrom-und Überspannungsableiter klein bleibt und die Zuleitungslänge zum Blitzstromableiter induktivitätsarm verlegt wird. Die in der Norm angegebene Länge der Anschlussleitung zum Blitzstromableiter verliert angesichts der physikalischen Kopplungsprozesse ihren Sinn, denn nicht die Leitungslänge, sondern deren Verlegung und die zum zu schützenden Gerät aufgespannte Fläche, in die das magnetische Feld einkoppelt, sind maßgebend. Ein V-förmiger Anschluss von Blitzstromableitern ist vorteilhaft. Dennoch ist es trotz Blitzstromableitern mit tiefem Schutzpegel notwendig, das zu schützende Sekundärgerät mit einem Überspannungsableiter zu schützen, da der Blitzstromableiter zwar einen tiefen Schutzpegel an seinen Klemmen bereitstellt, jedoch die Einkopplung des Magnetfeldes in die Schleife zum Sekundärgerät nicht verhindern kann. Weiterhin wurde festgestellt, dass ein Überspannungsableiter nach dem Ansprechen eines Blitzstromableiters durch die magnetische Kopplung des Stromes im Blitzstromableiter einen eingekoppelten Stoßstrom führt, der allerdings von den Varistoren beherrscht wird.
Insbesondere wurde die Beanspruchung der Blitzstromableiter im Vergleich mit der Belastung bei 10/350µs Stoßströmen verglichen, mit denen die Ableiter typengeprüft werden. Tabelle 4 zeigt aber, dass die Belastung deutlich geringer ist, da ein

Folgestoßstrom im max. 50 kA erreicht. Lediglich die Steilheit der Spannung an den Ableitern und die Steilheit des Stromes im Ableiter sind deutlich höher bei Folgestoßströmen und erfordern schnell ansprechende Ableiter.

1 EINLEITUNG 3

2 VORAUSSETZUNGEN FÜR BERECHNUNGEN VON VORGÄNGEN BEI FOLGEBLITZEN 4

3 BILDUNG VON MODELLEN VON SYSTEMKOMPONENTEN FÜR FOLGESTOßSTROM 9

3.1 Leitungen 9
3.1.1 Leitungen mit TEM Mode 9
3.1.2 Leitungen mit offenen Strukturen 11
3.1.3 Berücksichtigung der Stromverdrängung 28
3.1.4 Topologien von Leitungen 31
3.1.5 Gültigkeit der Modellierung von offenen Strukturen durch Wanderwellenleitungen 31

3.2 Erdung 32
3.2.1 Stab-Erder 32
3.2.2 Fundamenterder 39
3.2.3 Wasserleitungen, Gasleitungen, informationstechnische Leitungen in der Erde 39

3.3 Ableitermodelle für Blitzstrom-und Überspannungsableiter 40

3.4 Zähler, FI und andere im Strompfad vorhandene Geräte 43

3.5 Magnetische Kopplung von magnetisch und galvanisch gekoppelten Leitern 45
3.5.1 Schutzpegel von Blitzstromableitern 46
3.5.2 Schutzpegel von Blitzstrom-und Überspannungsableitern 47

4 FALLSTUDIEN 49

4.1 Einspeisung in ein TT-Netz 49
4.1.1 Verhalten eines N-PE Blitzstromableiters. 49
4.1.1.1 Erder als ohmscher Widerstand 49
4.1.1.2 Erder als Wanderwellenleitung 53
4.1.1.3 Vergleich der Ableitung mit und ohne Wanderwellenmodelierung bei einem Erdermodell als Kettenleiter 57
4.1.1.4 Vergleich der Ableitung mit und ohne Wanderwellenmodelierung bei einem Erdermodell als Kettenleiter und Vergleich zwischen Folgestoßstrom und der Stoßstromform 10/350 59
4.1.2 Verhalten von Blitzstromableitern im TT-Netz mit Modellierung des Erders als Kettenleiter und Modellierung der Fangstange als Wanderwellenmodellierung . 60

5 LITERATUR 63

6 ADRESSE DES AUTORS 63

1 Einleitung

Prüfungen von Komponenten für Blitzschutzanlagen beziehen sich überwiegend auf Prüfungen mit Stoßströmen der Form n/350 , und 8/20 sowie auf Stoßspannungsformen wie 1,2/50.
In den Normen werden aber in den statistischen Daten von Blitzströmen die negativen Folgeblitze mit einer Form 0,25/100 angegeben.(VDE V0185-1Blitzschutz Teil 1:Allgemeine Grundsätze, Tabelle 4 Folgestoßstrom). Weiterhin sind dort noch verschiedenste Kombinationen von Stoßströmen und Langzeitströmen angegeben, die in der Natur auftreten und ein gesamtes Blitzschutzsystem beanspruchen.
Wie verhalten sich Komponenten eines Blitzschutzsystems und das gesamte Blitzschutzsystem speziell bei Folgestoßströmen. Experimentell besteht die Schwierigkeit , solche Mehrfachfolgestoßströme mit einer Form 0,25/100im Labor zu erzeugen. Bisgherige Arbeiten beziehen sich diesen Gründen auf multiple Simulatoren für 8/20. (Meppelink 2000; 2001)
Bevor Generatoren für die Laborsimulation solcher Ströme aufgebaut werden, sollten Fragen nach dem Verhalten von Komponenten und Systemen bei Folgestoßströmen grundsätzlich untersucht werden. Im weitesten Sinne soll versucht werden, das Verhalten durch Modellierung und Berechnung mit Simulationsprogrammen zu verstehen. Aus diesen Berechnungen sollen dann Schlussfolgerungen für den Aufbau geeigneter Prüfeinrichutngen und Prüfmethoden für Folgestoßströme gezogen werden.

Dieser Zwischenbericht zeigt die Methodik und den derzeitigen Stand im Oktober 2002. Bedingt durch den starken Rückgang der Studierrendenzahlen in den letzten Jahren konnten die geplanten Arbeiten nicht durchgeführt werden. Daher kann dieser Zwischenbericht nur eine Übersicht und erste Teilergebnisse zeigen.

2 Voraussetzungen für Berechnungen von Vorgängen bei Folgeblitzen

Folgestoßströme mit einer Anstiegszeit von 250ns und einer Rückenhalwertzeit von 100µs erfordern eine Betrachtung der Systeme hinsichtlich der Gleichzeitigkeit. Sofern die Laufzeit einer elektromagnetischen Welle in einem System groß ist gegenüberder Anstiegszeit des Folestoßstromes, müssen die Wanderwellengesetze beachtet werden. In der Praxis rechnet man mit folgender Vereinfachung:

Ist die Anstiegszeit das 10-fache der Laufzeit im System, kann das System noch als quasistationär betrachtet werden. Dann hätten Strom und Spannung innerhalb des Systems zur gleichen Zeit an zwei verschiedenen Orten etwa um 10 % voneinander abweichende Strom-und Spannungswerte. Für den Fall des Folgestoßstromes bedeutet das folgendes:
Ab einer Länge von 7,5 m einer luftisolierten Leitung mit v=c, auf der ein Folgestoßstrom mit einer Anstiegszeit von 250 ns wirksam wird, muss mit Wanderwellengesetzen gerechnet werden.

Berechnung:
Eine Leitung mit einer Länge von 7,5 m in Luft mit v=C hat eine Laufzeit von

$$T = \frac{s}{c} = \frac{7,5m}{300m/\mu s} = 25ns$$

Die Anstiegszeit des Folgestoßstromes beträgt 250 ns. Die Bedingung ist daher erfüllt. Bei einer Leitung mit geringerer Ausbreitungsgeschwindigkeit als Lichtgeschwindigkeit verringert sich die Länge entsprechend.

Berechnung mit einem Wanderwellenprogramm[1]:
Bild 2.1 zeigt eine Schaltung zur Berechnung der Gleichzeitigkeitswerte. Die Spannung am Eingang (IN) und am Ausgang der Leitung (OUT) lässt sich für verschiedene Längen der Leitung berechnen. Bild 2.2 zeigt die Spannungen und die Differenz der Spannungen zwischen Eingang und Ausgang, bezogen auf die maximale Spannung

[1] Microcap. www.Spectrum-soft.com

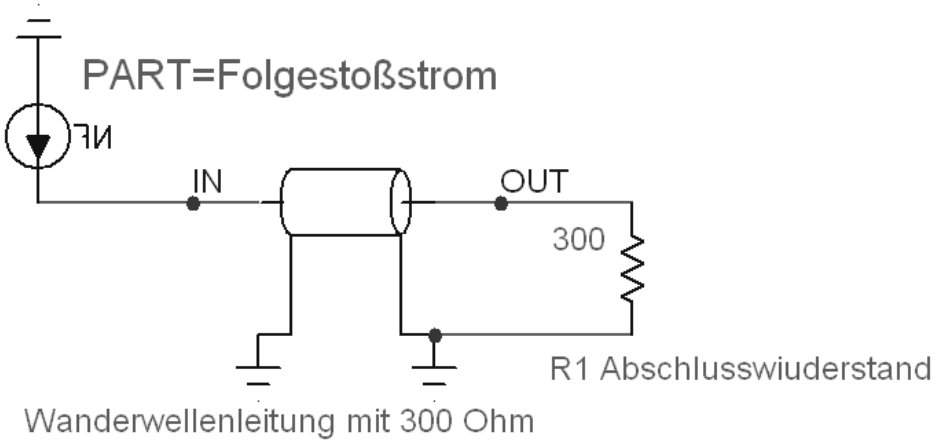


Bild 2.1 Schaltung zur Berechnung von Spannungen am Anfang und am Ende einer Leitung bei Anregung mit einem eingeprägten Folgestoßstrom 0,25/100.

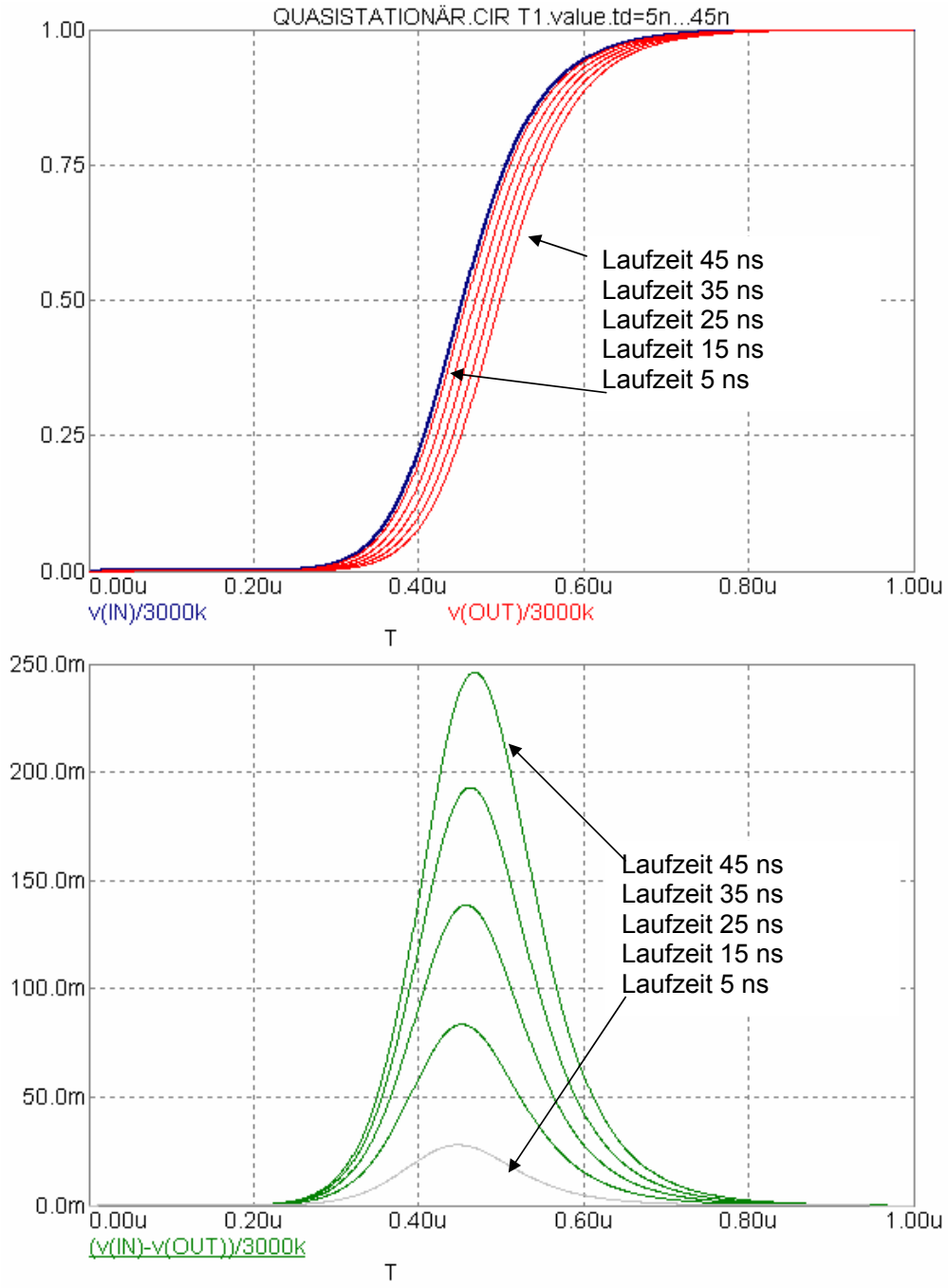


Bild2.2
Oben: Spannung am Eingang der Leitung V(IN) und am Ausgang der Leitung V(OUT) für Laufzeiten der Leitung von 5,15,25,35,45 ns.
Unten: Differenz der Spannungen bezogen auf die maximale Spannung = Gleichzeitigkeitsfehler

Schlussfolgerungen
Luftisolierte Leitungen mit v=c können bei einem Fehler zwischen Eingangsspannung und Ausgangsspannung von <15 % bis zu einer Länge von ca.7,5 m ohne Wanderwellengesetzte berechnet werden. Soll der Fehler kleiner 10 % bleiben, muss die Leitungslänge kleiner 5 m bleiben.
Für Leitungen mit Isolierstoffen reduzieren sich die Längen entsprechend der reduzierten Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Bei einem Gebäude mit Abmessungen von einigen 10 m scheidet daher eine Berechnung mit konzentrierten Elementen wie R,L,C aus. Lediglich innerhalb eines Schaltschrankes mit Abmessungen <5*5m kann eine Berechnung noch mit konzentrierten Elementen, allerdings bei einem Fehler von 10 % durchgeführt werden.

Vergleich Zeit und Frequenzbereich.
Oftmals ist eine Aussage überphysikalische Vorgänge im Frequenzbereich einfacher, obwohl die Physik bei eignem Folgestoßstrom nichts mit Frequenzen zu tun hat. Dennoch soll im Folgenden kurz darauf eingegangen werden.

Der einfachste Falleiner Betrachtung im Frequenzbereich ist die Fortsetzung eines Anstieges im periodischen Bereich. Das bedeutet für eine Anstiegszeit von 250 ns wird eine periodische Schwingung mit einer Periodendauer von 1 MHz zugrunde gelegt.

Eine genauere Betrachtung führt über das Fourierspektrum zu folgenden Aussagen:

Aus Bild 2.3 folgt, dass der Betrag des Amplitudendichtespektrums eines Folgstoßstromes bei 1 MHz bereits auf einen Wert von 0,5% abgeklungen ist. Bild2.4 zeigt allerdings für das Spektrum der Stromänderung bei 1 MHz noch einen beachtlichen Wert. Das Amplitudendichtespektrum erreicht erst bei 5 MHz einen Wert von etwa 0,1 %.

Schlussfolgerungen:
Für Betrachtungen im Frequenzbereich sollten Frequenzen von 1 MHz ausreichend genaue Ergebnisse für den Folgestoßstrom liefern, während für die Stromänderung des Folgestoßstromes Frequenzen bis 5 MHz berücksichtigt werden sollten.

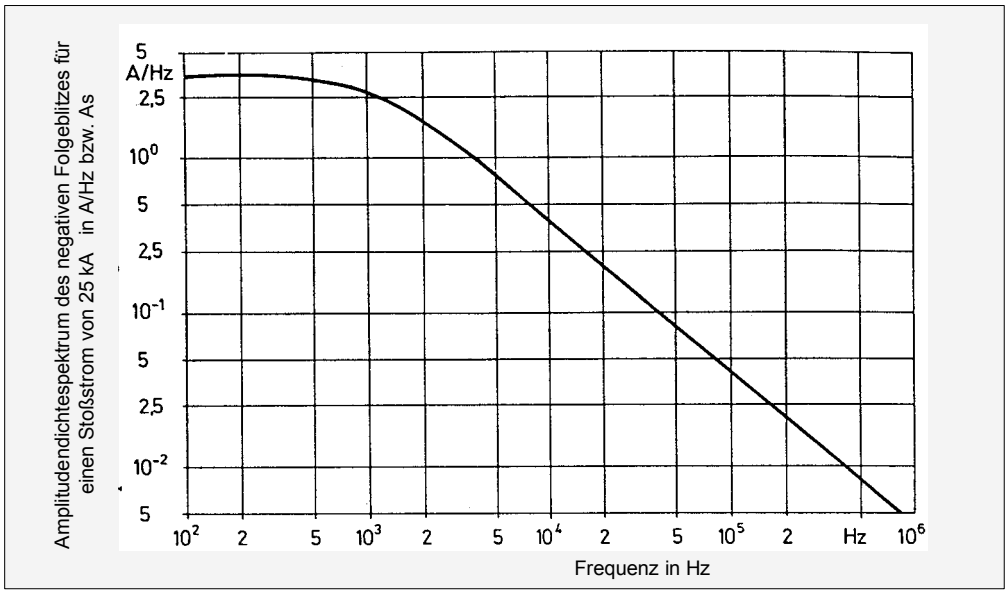


Bild 2.3 Amplitudendichtespektrum (Betrag) des negativen Folgestoßstromes für eine Höhe von 25 kA in A/Hz bzw. As. Quelle : VG Normen VG95371-10:1995-11

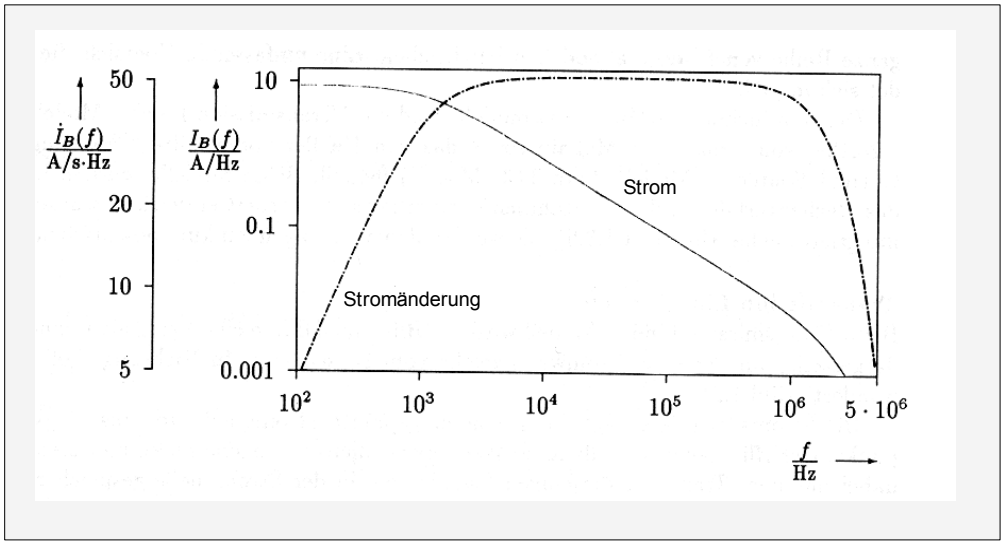


Bild 2.4 Amplitudendichtespektrum (Betrag) der Stromänderung und des Stromes des negativen Folgestoßstromes für eine Höhe von 50 kA in A/Hz bzw. As. Quelle : Beierl, Ottmar. Elektromagnetische Verträglichkeit beim Blitzeinschlag in ein Gebäude. Fortschrittberichte VDI Reihe 21 Elektrotechnik, Nr. 93.

3 Bildung von Modellen von Systemkomponenten für Folgestoßstrom

3.1 Leitungen

Für die Installationen sind Kabel und Leitungen als auch die Ableitungen des Blitzschutzsystems zu verstehen. Für jede Gruppe von Leitungen, Koaxialleitungen, Mehradrige Leitungen und Ableitungen ergeben sich andere Modelle.

3.1.1 Leitungen mit TEM Mode

Leitungen, in denen sich transversale elektromagnetische Wellen ausbilden, bei denen der Abstand der Leitungen zueinander klein ist gegenüber der Längenausdehnung der Leitungen, können als TEM Leiter durch Wellenwiderstände und Laufzeiten modelliert werden. Es ist ebenso möglich, die Beläge anzugeben, d.h. Kapazitäts-, Induktivitäts- und Widerstands oder Ableitungsbelag. Rechenprogramme wie Microcap/Pspice erlauben jedoch nur die Verwendung von 3 dieser Parameter.
Bild 3.1.1.1 zeigt als Beispiel eine Schaltung mit einer Einkopplung eines Folgeblitzstromes in eine homogene Wanderwellenleitung. Bei der Simulation in Bild 3.1.1.2 fällt auf, dass der Strom eingeprägt ist und sich nicht verändert. Die Spannung am Eingang der Leitung schwingt hingegen mit einer Periodendauer entsprechend der vierfachen Laufzeit der Leitung, hier also 400 ns.
Bild 3.1.1.1 zeigt als Beispiele die Modellierung einer Leitung mit einem Wellenwiderstand von 300 Ohm und einer Laufzeit von 100 ns mit Anregung durch einen Folgestoßstrom 0,25/100 mit einem Scheitelwert von 10kA.
Bild 3.1.1.2 zeigt das Ergebnis der Simulation einer Leitung nach Bild 3.1.1.1 mit einem Wellenwiderstand von 300 Ohm und einer Laufzeit von 100 ns mit Anregung durch einen Folgestoßstrom 0,25/100 mit einem Scheitelwert von 10kA.

((10e3/.993)*exp(-(T)/143e-6)*((T)/0.454e-6)10/(1+((T)**10/(0.454e-6)**10)))**

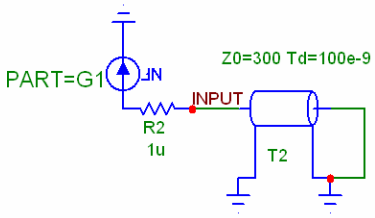


Bild 3.1.1.1 Modellierung einer Leitung mit einem Wellenwiderstand von 300 Ohm und einer Laufzeit von 100 ns mit Anregung durch einen Folgestoßstrom 0,25/100 mit einem Scheitelwert von 10kA.

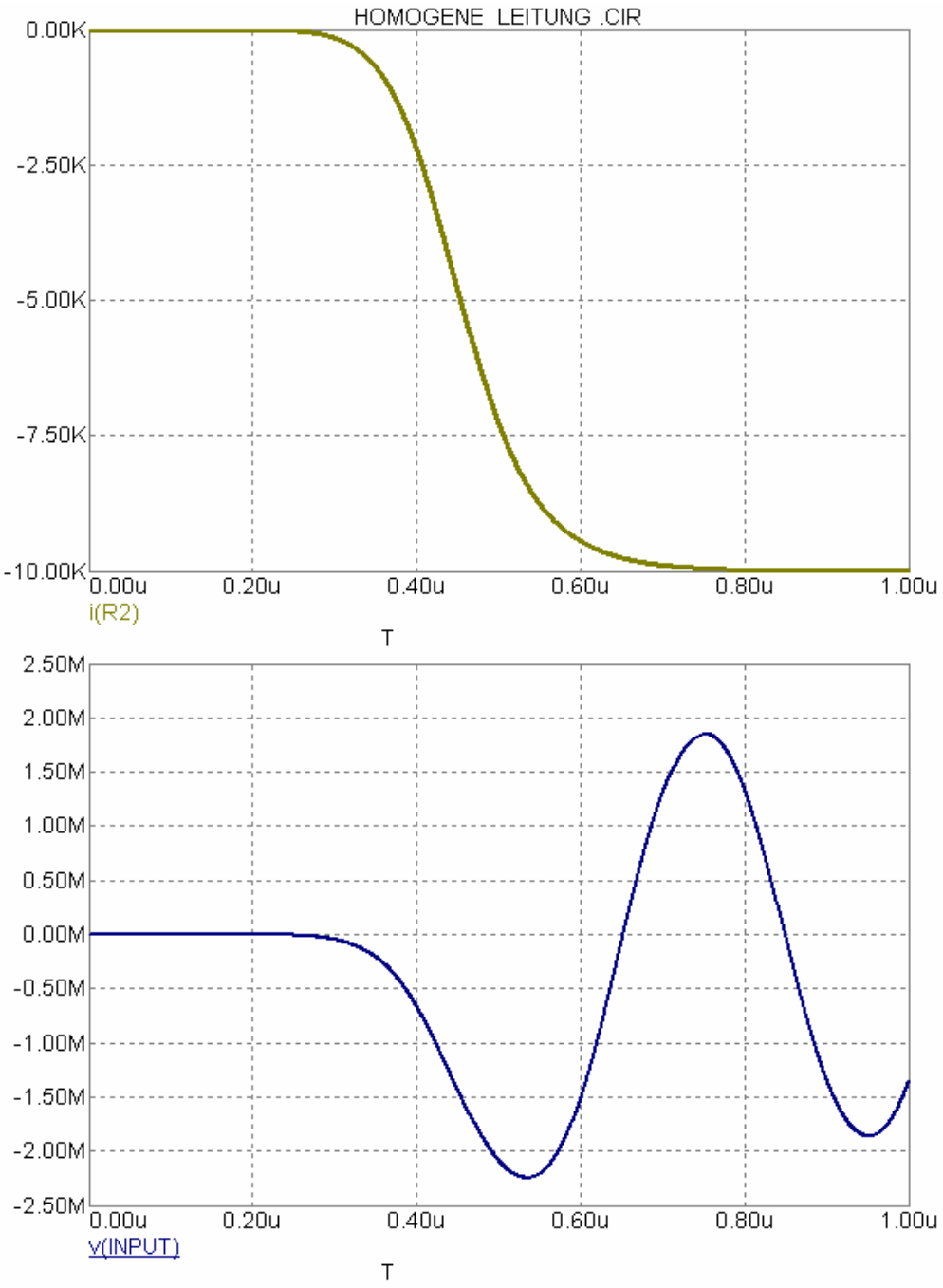


Bild 3.1.1.2 Simulation einer Leitung nach Bild 3.1.1.1 mit einem Wellenwiderstand von 300 Ohm und einer Laufzeit von 100 ns mit Anregung durch einen Folgestoßstrom 0,25/100 mit einem Scheitelwert von 10kA.

3.1.2 Leitungen mit offenen Strukturen

Bei Leitungen, wie Ableitungen eines Blitzschutzsystems kommen Vertikale und Horizontale Leitungen vor, deren Abstand zur Erde insbesondere bei horizontalen Leitungen groß ist gegenüber der Längsausdehnung. Einen Sonderfall stellt die rein vertikale Leitung dar. Auch für diese Leitungstypen kann ein Wellenwiderstand definiert werden, wie im Folgenden angegeben.
Bei diesen offenen Leitungen muss natürlich die Abstrahlung berücksichtigt werden, was die analytische Berechnung sehr viel aufwendiger macht und die numerische Berechnung ein entsprechendes Programm für den Zeitbereich erfordert.

Für einige orientierende Untersuchungen wird der Wellenwiderstand angegeben, der sich aus dem Induktivitäts-und Kapazitätsbelag ergibt.

Horizontale Leitung

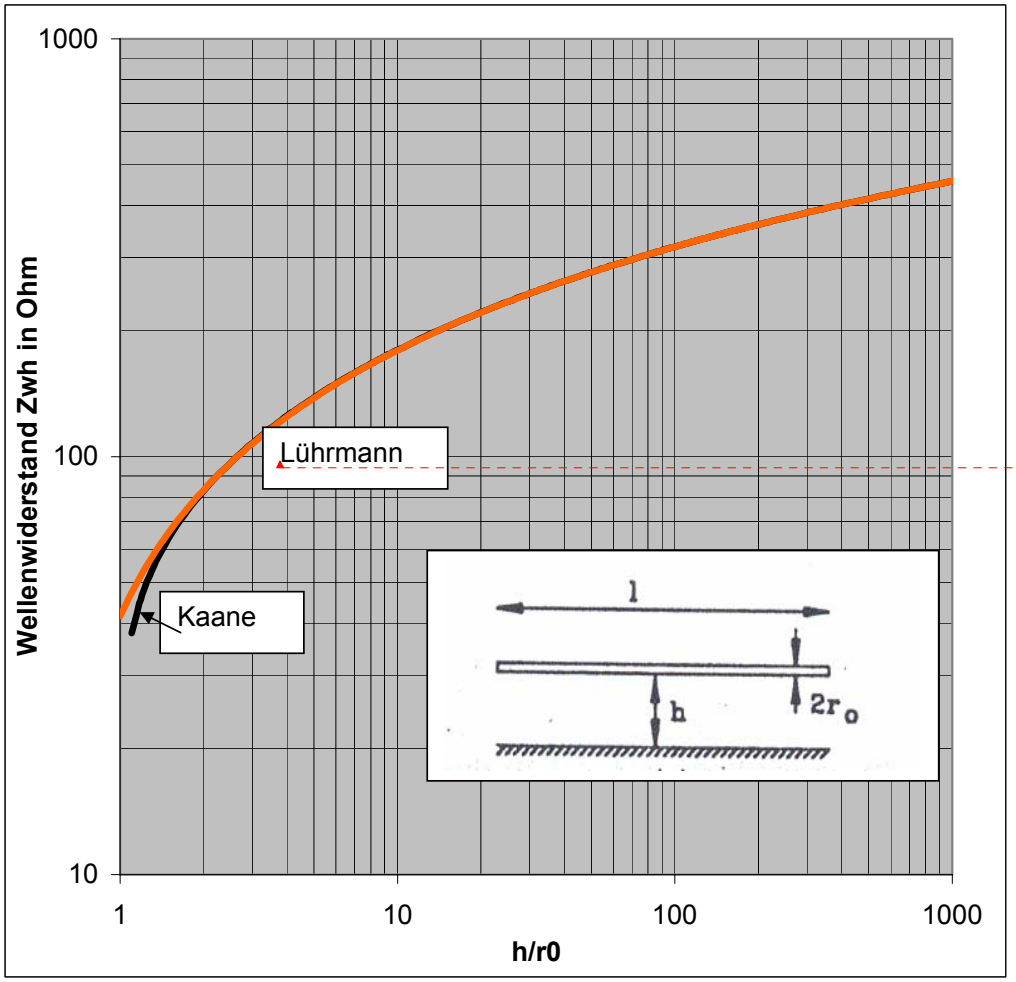
Die horizontale Leitung kann einfach berechnet werden, solange der Abstand des Leiters von dem Rückleiter klein gegenüber der Längenausdehnung bleibt.

Bild 3.1.2.1 zeigt den Verlauf für eine horizontale Leitung nach den Gleichungen nach Tabelle 3.1.2.1. Beide Gleichungen ergeben im technisch interessanten Bereich Übereinstimmung.

Quelle	Lührmannn[2]	Kaane[3]
Gleichung für Z Horizontaler Leiter	$Z = \frac{Z_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r_0}$ r_o: Leiterradius Z_0=377 Ohm.	$Z = \frac{Z_0}{2\pi} * \sqrt{k_1 * k_2}$ $k_1 = \ln\left(\frac{h}{r_0} + \sqrt{\left(\frac{h}{r_0}\right)^2 - 1}\right)$ $k_2 = \ln\left(\frac{2h}{r_0} + \frac{1}{4}\right)$ r_o: Leiterradius Z_0=377 Ohm.

Tabelle 3.1.2.1 Gleichungen zur Bestimmung des Wellenwiderstandes Z von horizontalen Leitungen aus der Literatur.

[2] Lührmann,H. Rasch veränderliche Vorgänge in räumlich ausgedehnten Hochspannungskreisen. Dissertation 1973
[3] Kaane Untersuchungen über breitbandige Präzisions-Hochspannungsteiler Diss Univ.Dortmund1993



Formatiert: Schriftartfarbe: Automatisch

Bild 3.1.2.1 Wellenwiderstand der horizontalen Leitung mit der Höhe h über der Ebene und dem Leiterradius r_0. Quelle: Kaane,H. Untersuchungen über breitbandige Präzisions-Hochspannungsteiler. Diss Univ.Dortmund1993 und Lührmann,H. Rasch veränderliche Vorgänge in räumlich ausgedehnten Hochspannungskreisen., Diss. 1973.

Vertikale Leitung

Für vertikale Leitungen findet man nur schwer eine verlässliche Gleichung für den Wellenwiderstand. Tabelle 3.1.2.2 zeigt zwei Gleichungen aus der Literatur. Der Wellenwiderstand muss von der Höhe des Leiters abhängen und ist je nach Ort, an dem man die vorlaufende Spannungs-und Stromwelle betrachtet, verschieden. Daher muss Z als Funktion von x angegeben werden, wenn x der betrachtete Ort vom Erdboden aus gerechnet ist. In der Literatur finden sich zwei Quellen, die sich jedoch im Ergebnis widersprechen. Insbesondere ist zu beachten, dass die Quellen die Einspeisung am Erdboden berechnet haben und dabei die Methode der Spiegelung an einer auf der Erde angeordneten Platte annehmen. Die Autoren gehen dabei von Kugelförmigen Wellenfronten aus, die sich vom Ursprung der vertikalen Leitung auf der Erde nach oben ausbreiten. Lührmann nimmt eine mit Lichtgeschwindigkeit c auf der Leitung laufende Linienladung konstanter Linienladungsdichte an. Weitere Ausführungen zu vertikalen Leitungen findet man bei Bayerl[4]. Auch Bayerl geht von den gleichen Voraussetzungen einer Wellenausbreitung vom Ursprung der vertikalen Leitung aus und verwendet Gleichungen für Kegelleitungen.

Der Wellenwiderstand kann daher nach Lührmann z.B. Abschnittsweise als konstant eingegeben werden, so dass er mit einem Rechenprogramm nachgebildet werden kann.

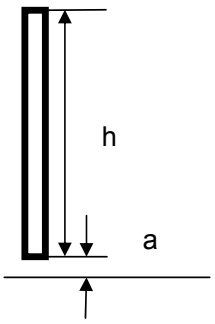
Quelle	Lührmannn	Kaane
Gleichung für Z Vertikaler Leiter  	$Z = \frac{Z_0}{2\pi} \ln \frac{2z}{r_o}$ r_o: Leiterradius; z : Höhe des vertikalen Leiters z ist groß gegenüber dem Radius des Leiters.	Für unendlichen Leiter $Z(x) = \frac{1}{2\pi} Z_0 k(x)$ $k(x) = 1 - \frac{r_0}{r_0 + 2x}$ r_o: Leiterradius x: laufende Koordinate des vertikalen Leiters.

Tabelle 3.1.2.2 Gleichungen zur Bestimmung des Wellenwiderstandes Z von vertikalen Leitungen aus der Literatur.

[4] Bayerl, O.: Elektromagnetische Verträglichkeit bei einem Blitzeinschlag in ein Gebäude.

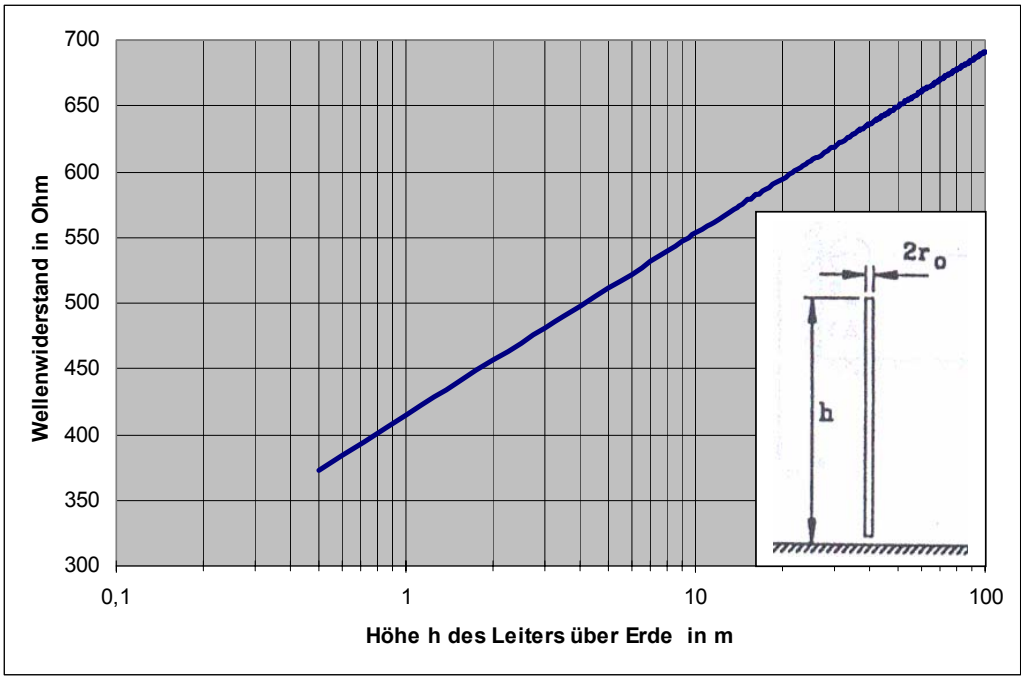


Bild 3.1.2.2 Wellenwiderstand der vertikalen Leitung mit der Höhe h über der Ebene und dem Leiterradius r_0 für einen Leiter mit einem Querschnitt von 50mm^2 berechnet nach der Gleichung von Lührmann,H. Rasch veränderliche Vorgänge in räumlich ausgedehnten Hochspannungskreisen., Diss. 1973.

Wird mit den berechneten Wellenwiderständen eine Berechnung mit einem Wanderwellenprogramm

a) **als konstanter Wellenwiderstand**
b) **als abschnittsweise konstanter Wellenwiderstand eingegeben**

durchgeführt, zeigen sich folgende Erkenntnisse:

a1) Modellierung mit konstantem Wellenwiderstand und Kurzschluss am Ende der Leitung

Bild 3.1.2.3 zeigt eine Modellierung einer 30 m hohen vertikalen Leitung mit einem **nicht abgestuften** Wellenwiderstand von 625 Ohm und einer Laufzeit von 100ns, die unten kurzgeschlossen ist. Aus den Gleichungen für den Wellenwiderstand

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

lässt sich der Induktivitätsbelag L`

$$L' = Z^2 C'$$

bei einem durchschnittlichen[5] Kapazitätsbelag von 7,2pF/m
zu 2,8 µH/m berechnen, so dass bei einer Länge von 30 m eine Induktivität von 84µH wirksam wird. Mit diesem Wert wird eine Vergleichsrechnung nach der Methode der konzentrierten Elemente durchgeführt. Beide Ergebnisse sind in Bild 3.1.2.4 dargestellt.
Die Simulation zeigt die Unterschiede. Die Modellierung als Leitung führt zu einer Wanderwellenschwingung der Spannung am Eingang der Leitung, während sich bei konzentrierter Induktivität das Differential des Folgestoßstromes ergibt. Die Induktivität wurde so gewählt, dass die Spannungsscheitelwerte identisch sind.
Die Wanderwellenschwingung ist durch den unendlich großen Innenwiderstand der Stromquelle bedingt, die ja direkt am Eingang der Leitung angeordnet ist. Dadurch ergeben sich Abweichungen gegenüber der Natur. **Dieser Effekt muss später beseitigt werden.**

[5] Hier ist zu beachten, dass der Kapazitätsbelag nicht konstant über die gesamte Länge verteilt ist. Daher wird ein Mittelwert zugrunde gelegt.

((10e3/.993)*exp(-(T)/143e-6)*((T)/0.454e-6)10/(1+((T)**10/(0.454e-6)**10)))**
((10e3/.993)*exp(-(T)/143e-6)*((T)/0.454e-6)10/(1+((T)**10/(0.454e-6)**10)))**

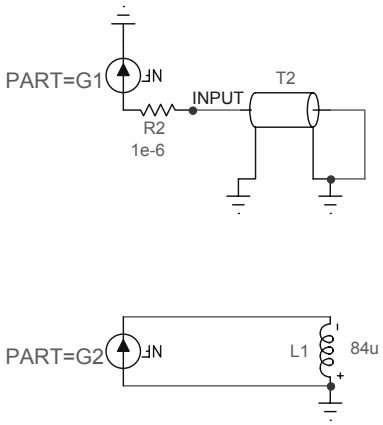


Bild 3.1.2.3 Modellierung einer 30 m hohen vertikalen Leitung einmal als Wanderwellenleitung mit konstantem Wellenwiderstand von 625 Ohm und einmal als Schaltung mit konzentrierter Induktivität von 84µH.
Eingeprägter Folgestoßstrom 0,25/100mit 10 kA Scheitelwert.

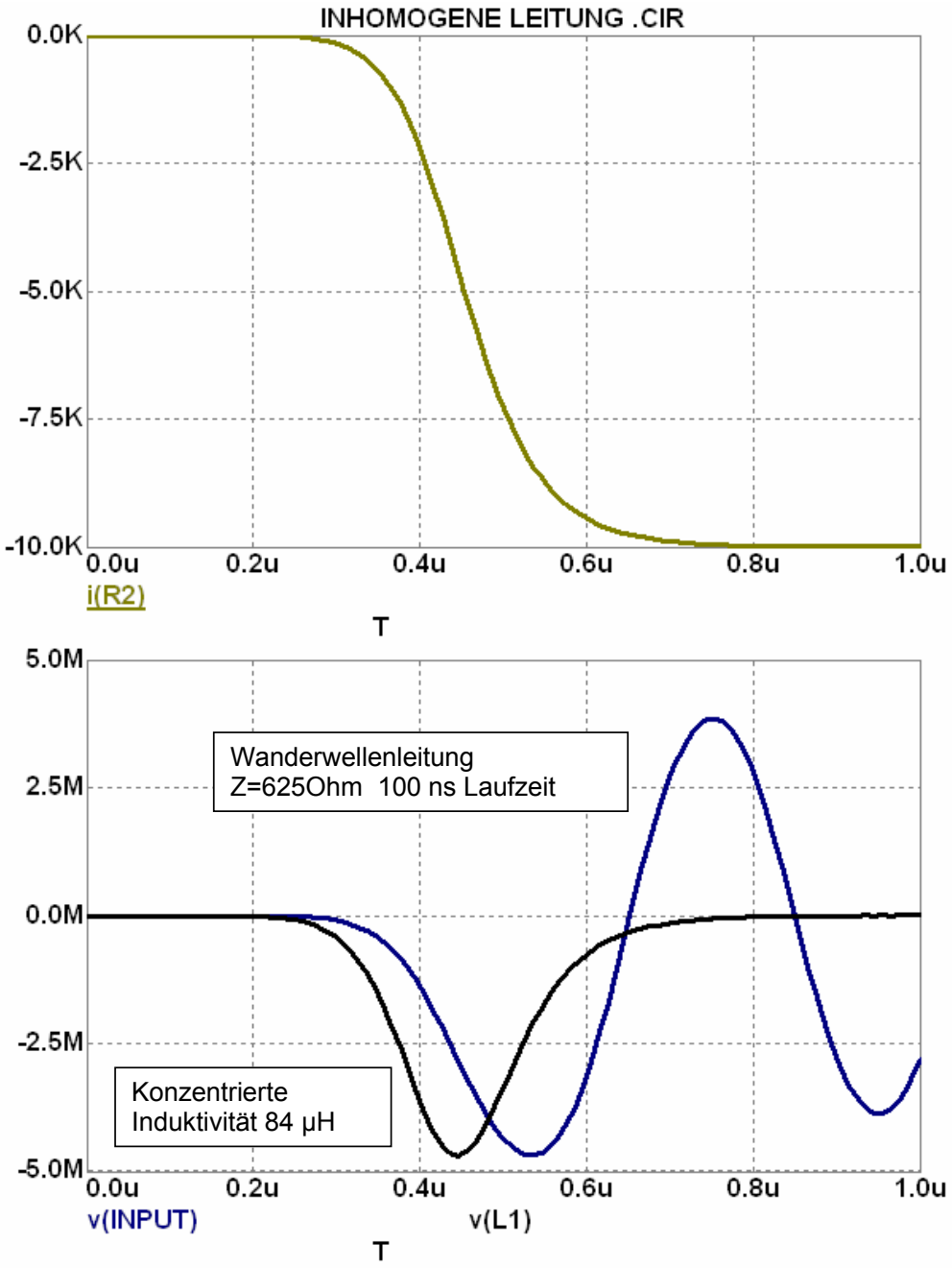


Bild 3.1.2.4 Analyse der Schaltung in Bild3.1.2.3. Oben: eingeprägter Folgestoßstrom0,25/100. Unten Spannung an der 30 m langen vertikalen Leitung einmal als Wanderwellenleitung mit Z=625 Ohm , einmal als konzentrierte Induktivität mit 84µH. Eingeprägter Folgestoßstrom 0,25/100mit 10 kA Scheitelwert.

a2) Modellierung mit konstantem Wellenwiderstand und Abschluss der Leitung mit einem ohmschen Widerstand.

Zum Vergleich soll die Wirkung eines Erdungswiderstandes aufgezeigt werden. Bild 3.1.2.5 zeigt eine Modellierung einer 30 m hohen vertikalen Leitung mit einem Wellenwiderstand von 625 Ohm und einer Laufzeit von 100ns, die unten mit einem ohmschen Widerstand von 5 Ohm abgeschlossen ist. Ergebnisse der Simulation sind in Bild 3.1.2.6 dargestellt.

Der eingeprägte Strom bleibt auch bei Abschluss der Leitung unverändert. Es überlagern sich jedoch Wanderwellenschwingungen. Der Strom im Abschlusswiderstand RE zeigt eine deutliche Überhöhung, so dass statt den eingespeisten 10 kA hier Werte von 15 kA auftreten.
Die Spannung am Erder erreicht eine maximale Spannung von rund 5 MV.

((10e3/.993)*exp(-(T)/143e-6)*((T)/0.454e-6)10/(1+((T)**10/(0.454e-6)**10)))**

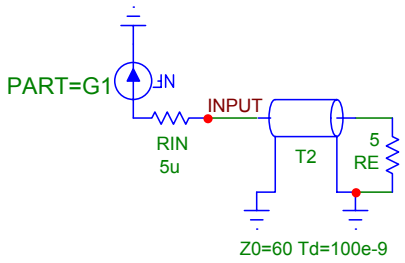


Bild 3.1.2.5 Modellierungen einer 30 m hohen vertikalen Leitung einmal als Wanderwellenleitung mit konstantem Wellenwiderstand von 60 Ohm, die mit einem Widerstand RE von 5 Ohm abgeschlossen ist. Eingeprägter Folgestoßstrom 0,25/100mit 10 kA Scheitelwert.

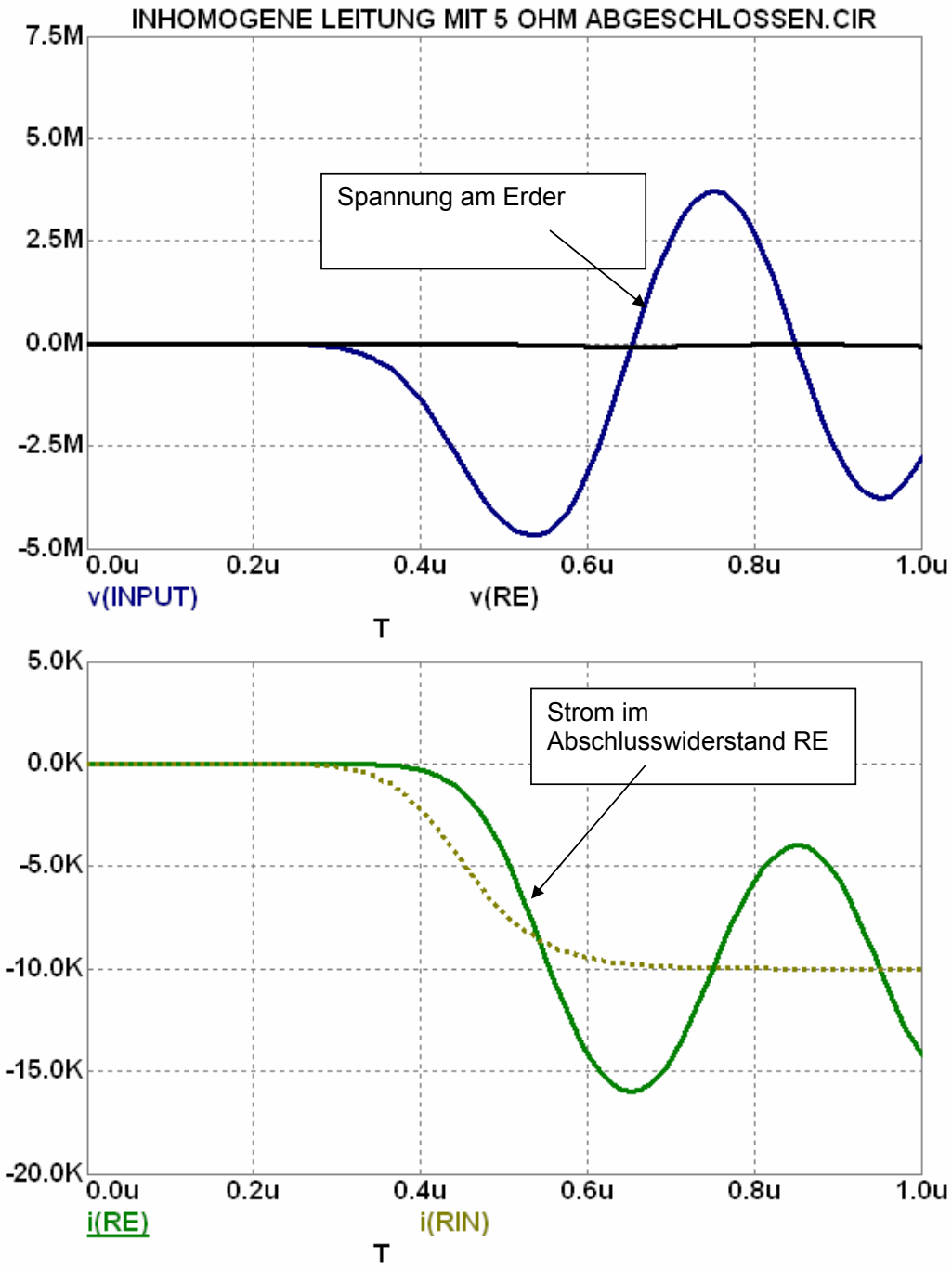


Bild 3.1.2.6 Analyse der Schaltung in Bild3.1.2.5. Oben: Spannung an der Einspeisung der 30 m langen vertikalen Leitung und Spannung am Abschlusswiderstand RE. Scheitelwert. Unten: eingeprägter Folgestoßstrom0,25/100und Strom im Abschlusswiderstand RE. Eingeprägter Folgestoßstrom 0,25/100mit 10 kA

b1) Modellierung mit abschnittsweise konstantem Wellenwiderstand und Kurzschluss am Ende der Leitung

Wie bereits bei der Berechnung des Wellenwiderstandes einer vertikalen Leitung festgestellt, muss der Wellenwiderstand[6] für ein Rechenprogramm abschnittsweise konstant eingegeben werden.
Weiterhin ist zu beachten, dass die Leitung nach oben fortgesetzt ist durch den Blitzkanal, an dessen oberem Ende eine eingeprägte Stromquelle wirkt. Daher wird ein 3000 m langer Blitzkanal zugrunde gelegt. Die Blitzfangstange soll 30 m hoch sein. Die Strecke von der Spitze der Fangstange bei 30 m bis zum Stromgenerator am Ende des 3000 m langen Blitzkanals wird als verlustlose Leitung mit konstantem Wellenwiderstand 691 Ohm nach Lührmann angegeben. Die eigentliche Fangstange wird gemäß Tabelle 3.1.2.1 in Leitungsabschnitte von 5 m Länge mit jeweils konstantem Wellenwiderstand unterteilt.

In der folgenden Tabelle zeigt eine Stufung für eine 30 m hohe Fangstange. In Bild 3.1.2.7 ist diese Stufung in ein Schaltbild umgesetzt. Die Leitung ist bis zu einer absoluten Höhe von 3030 m fortgesetzt, dort befindet sich die Stromquelle für einen Folgeblitz.

h	Z[7]	L`	C`	V m/s	Länge m	LEN[8]	Laufzeit ns
3000	691,142182	2,30381E-06	4,82293E-12	300000000	3000	3000	10000
30	618,86547	2,06288E-06	5,3862E-12	300000000	5	5	16,665
25	607,92037	2,0264E-06	5,48317E-12	300000000	5	5	16,665
20	594,524651	1,98175E-06	5,60672E-12	300000000	5	5	16,665
15	577,254565	1,92418E-06	5,77446E-12	300000000	5	5	16,665
10	552,913745	1,84305E-06	6,02867E-12	300000000	5	5	16,665
5	511,30284	1,70434E-06	6,51929E-12	300000000	5	5	16,665
0,01	138,228436	4,60761E-07	2,41147E-11	300000000	5	5	16,665

Tabelle 3.1.2.1 Wellenwiderstände nach Lührmann für eine vertikale Leitung

Damit der Strom an der Spitze der Fangstange den gewünschten Stromverlauf erhält (0,25/100), der durch Messungen bei echten Blitzeinschlägen gefunden wurde[9], muss eine Reflexion am Generator vermieden werden. Der Stromgenerator ist eine Stromquelle mit hohem Innenwiderstand. Um Reflexionen zu vermeiden, kann daher ein ohmscher Widerstand von 691 Ohm mit der Größe des Wellenwiderstandes des Blitzkanals parallel geschaltet werden. Dadurch wird erreicht, dass der Strom eingeprägt ist und dass keine störenden Reflexionen auftreten. Diese Schaltung zeigt Bild 3.1.2.7.

---

[6] Aus den bekannten Wellenwiderständen und der Ausbreitungsgeschwindigkeit v=c lassen sich die Leitungsparameter abschnittsweise angeben zu

$$L` = \frac{Z}{v} \qquad C` = \frac{1}{v * Z}$$

[7] Werte nach den Angaben nach Lührmann
[8] Wert für Rechenprogramm mit verlustbehafteten Leitungen

[9] Siehe Arbeiten von Berger und Rakov und frühere Literatur

Die Ergebnisse zeigt Bild 3.1.2.8-10.
Es fällt auf, dass die die in a1 und a2 beobachteten Wanderwellenschwingungen verschwunden sind. Sie sind auf den Effekt der Reflexion an der Stromquelle zurückzuführen. Be Simulationen muss also immer eine Verlängerung der Fangstange berücksichtigt werden, wenn mit Wanderwellenleitungen modelliert wird. Alle Modelle stimmen recht gut überein, so dass man statt der abschnittsweisen Leitungsmodellierung auch mit einer einzigen Leitung mit dem Wellenwiderstand am Ort der Einkopplung rechnen kann. Die Rechnung zeigt auch eindeutig die Spannungsabfälle in Abhängigkeit von der Höhe bis zum Ende der Fangstange.
Die Modellierung mit einer Induktivität von 62µH zeigt erstaunlich gute Ergebnisse im Vergleich mit der Leitungsmodellierung. Aus der Berechnung nach Lührmann erhält man in einer Höhe von 30 m einen Induktivitätswert von 2,06µH/m, so dass sich für 30 m ein Wert von 62 µH ergibt.

((50e3/.993)*exp(-(T)/143e-6)*((T)/0.454e-6)10/(1+((T)**10/(0.454e-6)**10)))**
((50e3/.993)*exp(-(T)/143e-6)*((T)/0.454e-6)10/(1+((T)**10/(0.454e-6)**10)))**
((50e3/.993)*exp(-(T)/143e-6)*((T)/0.454e-6)10/(1+((T)**10/(0.454e-6)**10)))**

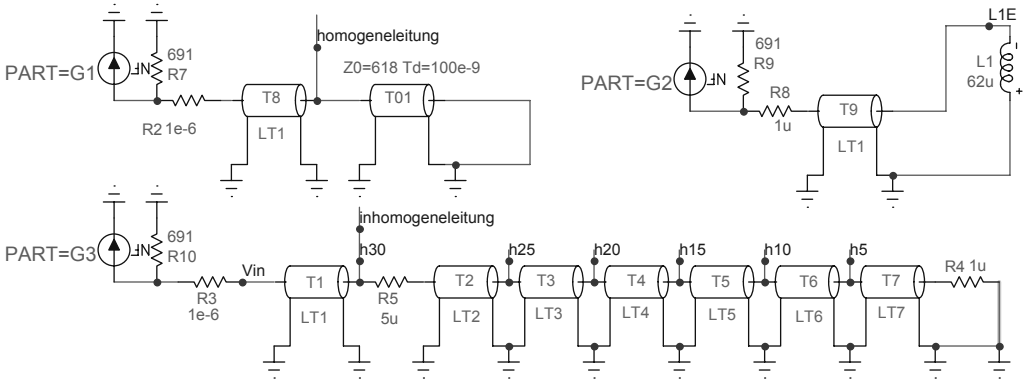


Bild 3.1.2.7 Schaltung zur Simulation durch Leitungen mit abschnittsweise konstanten Wellenwiderständen und Modellierung der Wanderwellenleitungen LT2-LT7 als verlustbehaftete Leitung mit 12 mOhm/m Widerstandsbelag LT1 als verlustlose Leitung.

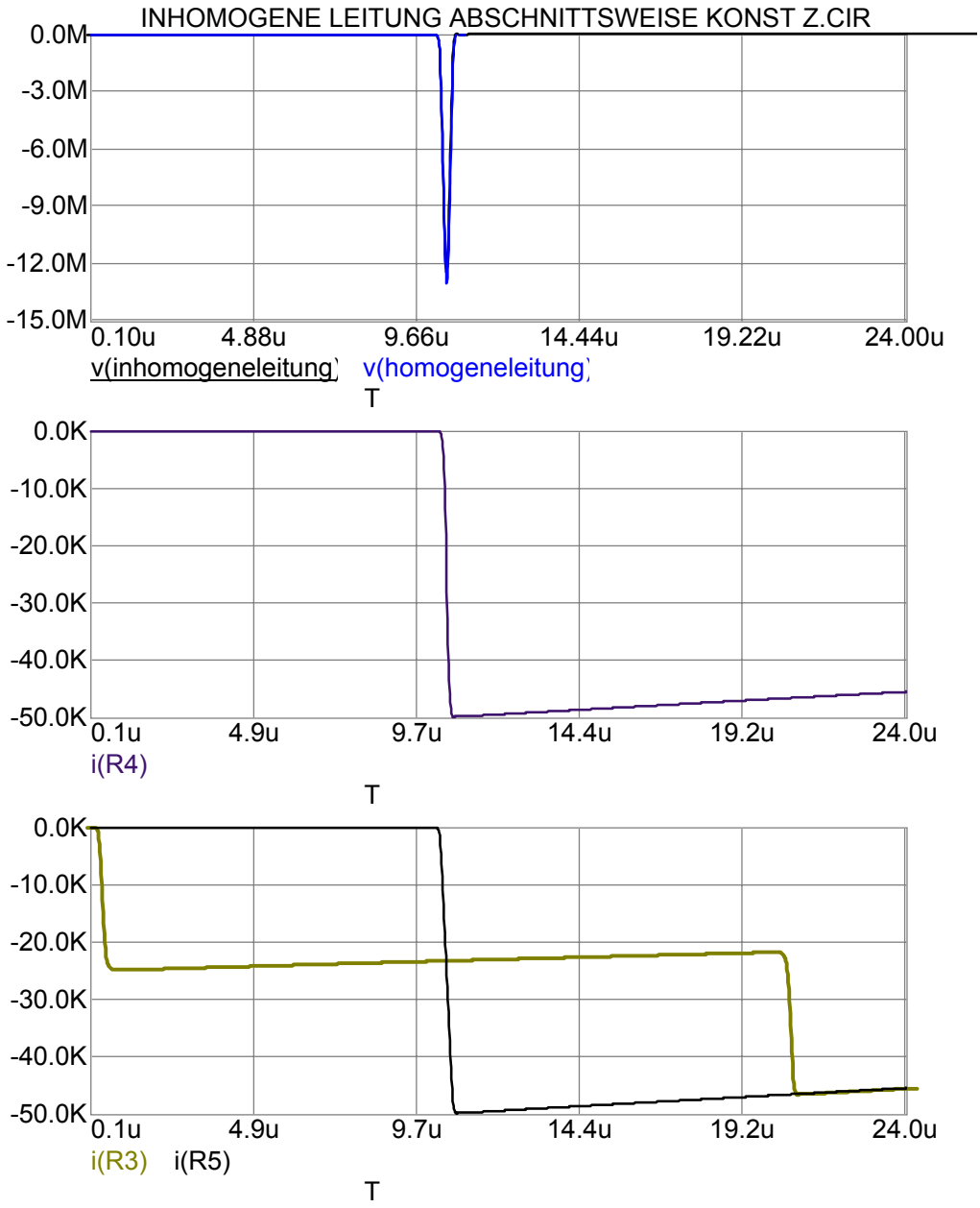


Bild 3.1.2.8 Verhalten der Ströme und Spannungen in der Schaltung nach Bild 3.1.2.7. Der Stromverlauf ist im weiteren Zeitbereich bis zum Abklingen des Folgestoßstromes frei von Schwingungen oder Reflexionen.

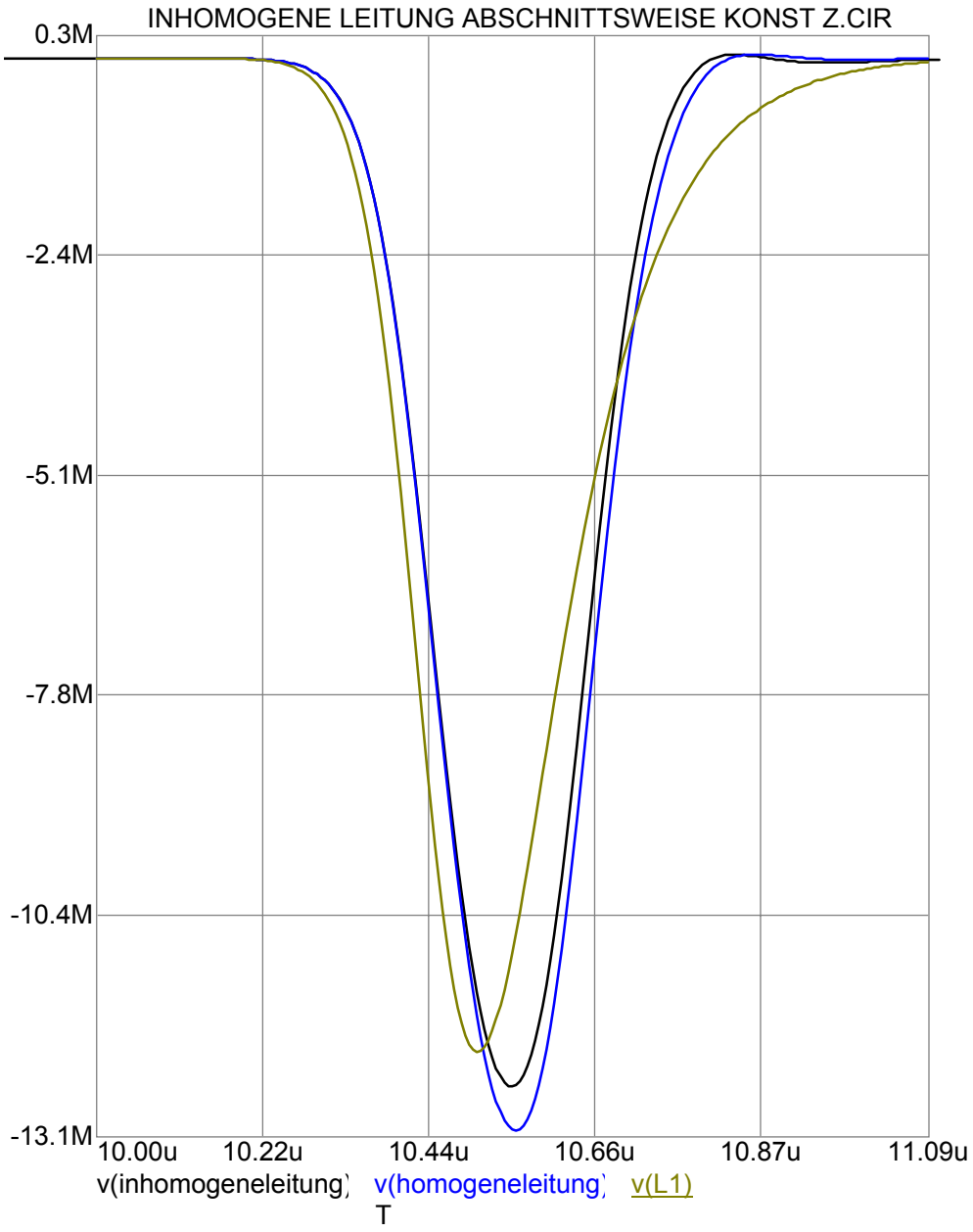


Bild 3.1.2.9 Ergebnisse der Simulation der Schalung nach Bild 3.1.2.7. Hier Auflösung der Spannungen an den verschiedenen Modellen.

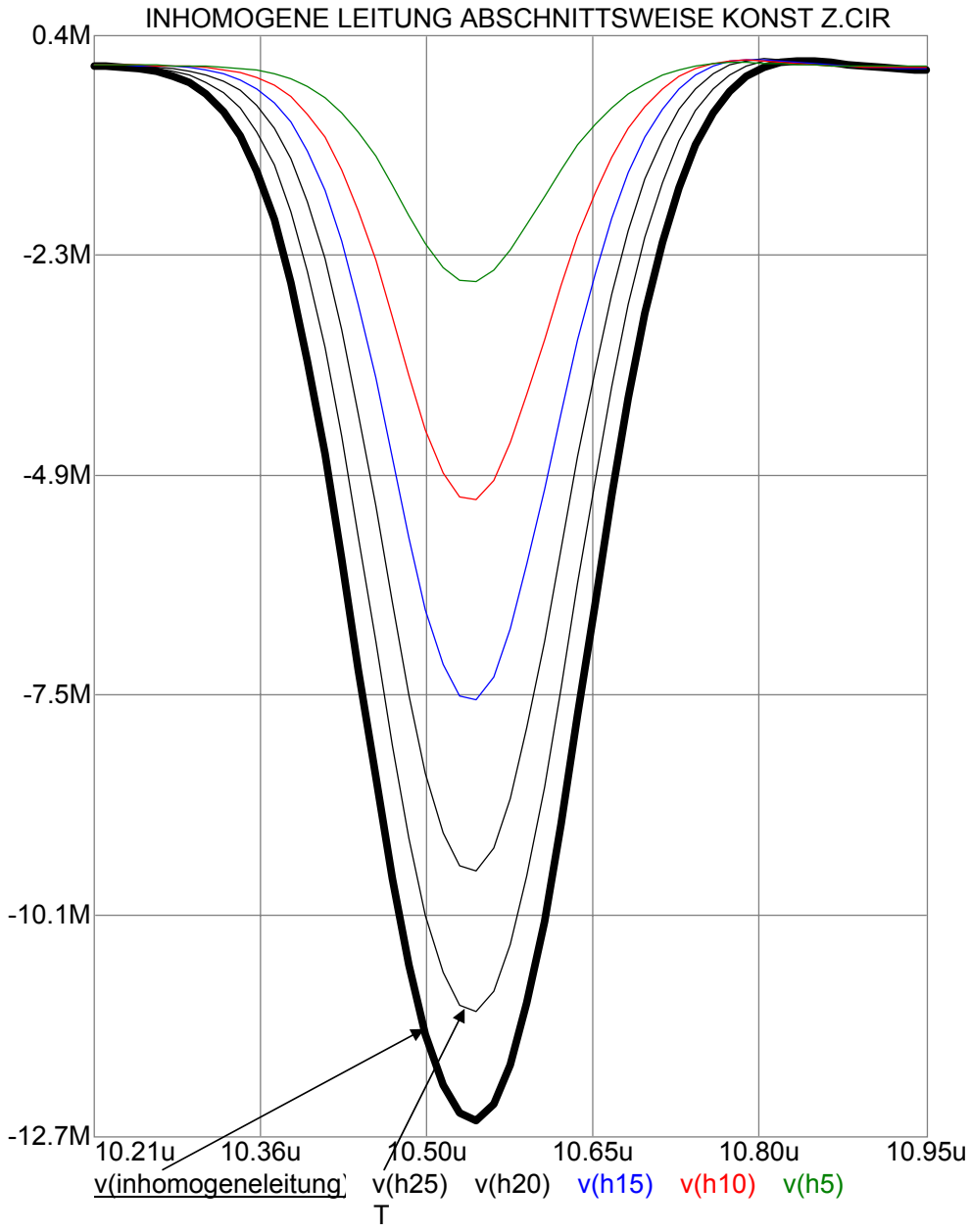


Bild 3.1.2.10 Ergebnisse der Simulation der Schaltung nach Bild 3.1.2.7.
Hier Spannungen an den einzelnen Abschnitten der Ableitung mit höherer Auflösung.

b2) Modellierung mit abschnittsweise konstantem Wellenwiderstand und Erdungswiderstand am Ende der Leitung

Bild 3.1.2.11 zeigt die Schaltung zur Simulation, die sich nur um den Erdungswiderstand RE von Bild 3.1.2.7 unterscheidet. Es zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede, lediglich nach dem Scheitel des Stoßstromes erkennt man die Gleichkomponente am Erdungswiderstand.
Bild 3.1.2.12 zeigt das ‚Ergebnis der Simulation.

((50e3/.993)*exp(-(T)/143e-6)*((T)/0.454e-6)10/(1+((T)**10/(0.454e-6)**10)))**
((50e3/.993)*exp(-(T)/143e-6)*((T)/0.454e-6)10/(1+((T)**10/(0.454e-6)**10)))**
((50e3/.993)*exp(-(T)/143e-6)*((T)/0.454e-6)10/(1+((T)**10/(0.454e-6)**10)))**

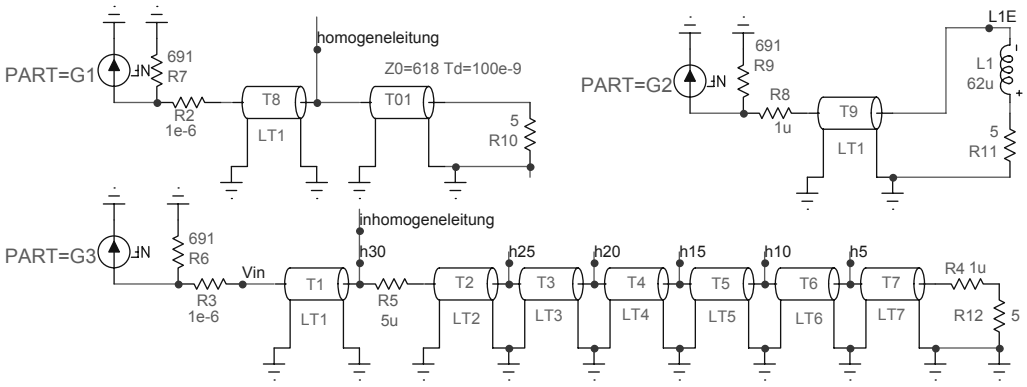


Bild 3.1.2.11 Schaltung zur Simulation durch Leitungen mit abschnittsweise konstanten Wellenwiderständen und Modellierung der Wanderwellenleitungen LT2-LT7 als verlustbehaftete Leitung mit 12 mOhm/m Widerstandsbelag LT1 als verlustlose Leitung. Abschluss der Leitungen mit einem Erdungswiderstand von 5 Ohm

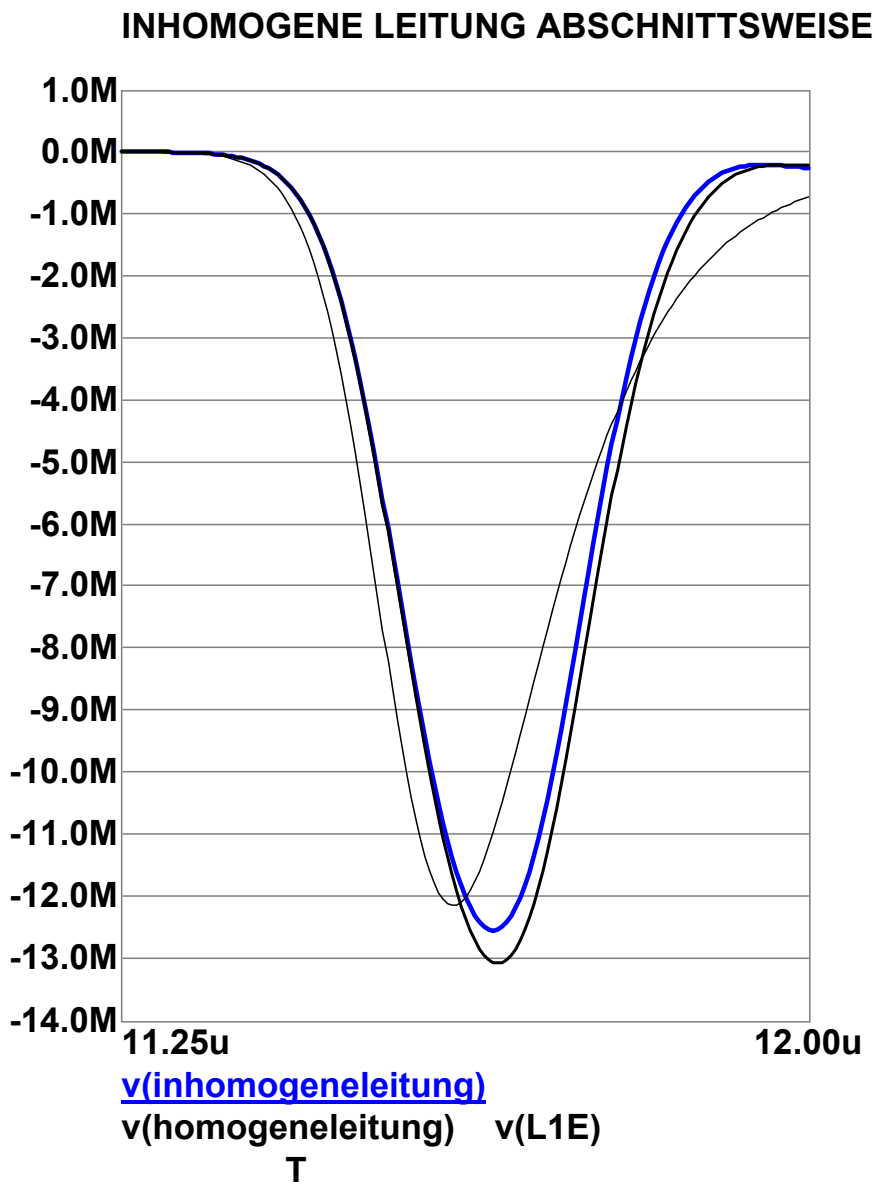


Bild 3.1.2.12 Ergebnisse der Simulation der Schalung nach Bild 3.1.2.11.
Mit RE = 5 Ohm

Schlussfolgerungen:

Eine gute Modellierung einer Fangstange kann mit einer Induktivität erfolgen, die sich aus dem Wellenwiderstand einer inhomogenen Leitung berechnen lässt.

Eine Modellbildung mit einem konstanten Wellenwiderstand, der sich aus der Berechnung nach Lührmann ergibt, ist ausreichend genau.

Eine Modellierung mit abschnittsweise konstanten Leitungselementen ist nur in Sonderfällen erforderlich.

Die Dämpfung des Leitermaterials der Fangstange spielt keine Rolle bei technischen Querschnitten von Fangstangen. Lediglich bei Edelstahl kann das eine Auswirkung zeigen.

Bei der Stromeinspeisung mit Stromquellen ist besonders auf die Vermeidung von Reflexionen zu achten. Daher sollte die Stromquelle über eine Wanderwellenleitung mit dem Wellenwiderstand der Leitung parallel abgeschlossen werden.

3.1.3 Berücksichtigung der Stromverdrängung

Für den Rundleiter sind im Folgenden die Gleichungen[10] der inneren Impedanz von Rund und Rechteckleitern für kleine und hohe Frequenzen angegeben. Auch diese Gleichungen sind Näherungsgleichungen, jedoch ausreichender Genauigkeit. Folgende Tabelle zeigt zum Vergleich die Impedanz von Rundleitern im Vergleich mit Flächenleitern. Ein Flächenleiter mit gleichem Querschnitt hat immer eine kleinere Impedanz als ein Rundleiter gleichen Querschnitts. Die innere Induktivität von Rund als auch von Flächenleitern kann bei hohen Frequenzen vernachlässigt werden, weil das Feld durch die Stromverdrängung an den Leiterrand gedrängt wird. Bild 3.1.3.1 und 3.1.3.2 zeigt eine Auswertung für Rundleiter für eine Frequenz von 1 MHZ.

Es gilt: $x = \frac{r_0}{2}\sqrt{\frac{\omega\kappa\mu}{2}} = \frac{r_0}{2\delta}$

Für starke Stromverdrängung x>1

$$\frac{R}{R_0} = x + \frac{1}{4} + \frac{31}{64x}; \qquad \frac{\omega Li}{R_0} = x - \frac{3}{64x}; \qquad \frac{Li}{L_0} = \frac{1}{x} - \frac{3}{64x^3}$$

R : Widerstand des Rundleiters
R0 : Gleichstromwiderstand des Rundleiters
Li :Innere Induktivität des Rundleiters
L0 :Innere Induktivität des Rundleiters bei Gleichstrom.

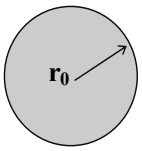
	Innere Impedanz bei starker Stromverdrängung (HF)
	$\lvert Z\rvert = \sqrt{R_0^2\left(\frac{r_0}{2\delta} + \frac{1}{4} + \frac{31}{64\frac{r_0}{2\delta}}\right)^2 + R_0^2\left(\frac{r_0}{2\delta} - \frac{3}{64\frac{r_0}{2\delta}}\right)^2}$
	$\lvert Z\rvert = \frac{l}{b}\sqrt{\frac{\omega\mu}{8\kappa}\left[\left(\frac{\sinh\frac{d}{\delta} + \sin\frac{d}{\delta}}{\cosh\frac{d}{\delta} - \cos\frac{d}{\delta}}\right)^2 + \left(\frac{\sinh\frac{d}{\delta} - \sin\frac{d}{\delta}}{\cosh\frac{d}{\delta} - \cos\frac{d}{\delta}}\right)^2\right]}$

Tabelle 3.1.3.1 Gleichungen zur Berechnung der inneren Impedanz von Rund-und Flächenleitern

[10]Schunk, H.: Stromverdrängung UTB Verlag Hüthig

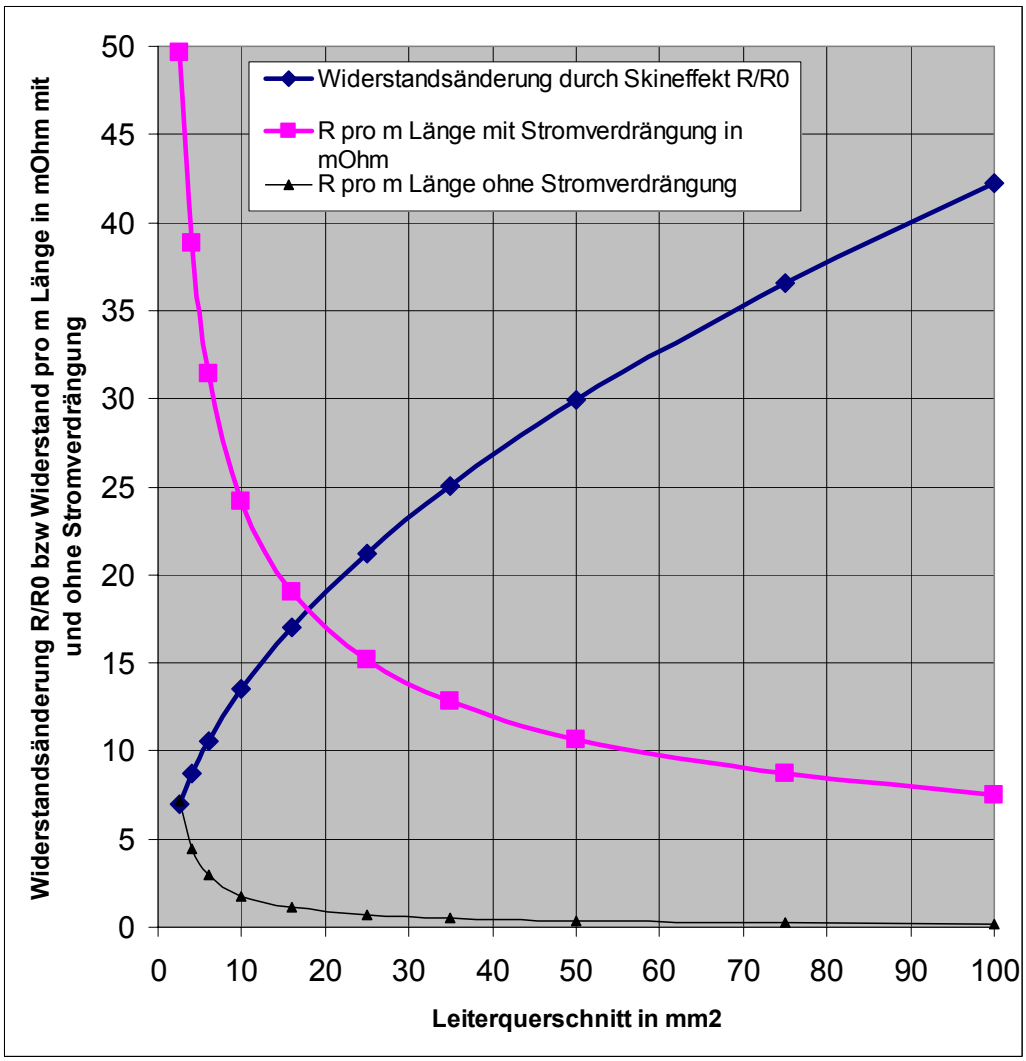


Bild 3.1.3.1 Widerstand von **Rundleitern** aus Kupfer unter Berücksichtigung der Stromverdrängung für eine Frequenz von 1 MHz

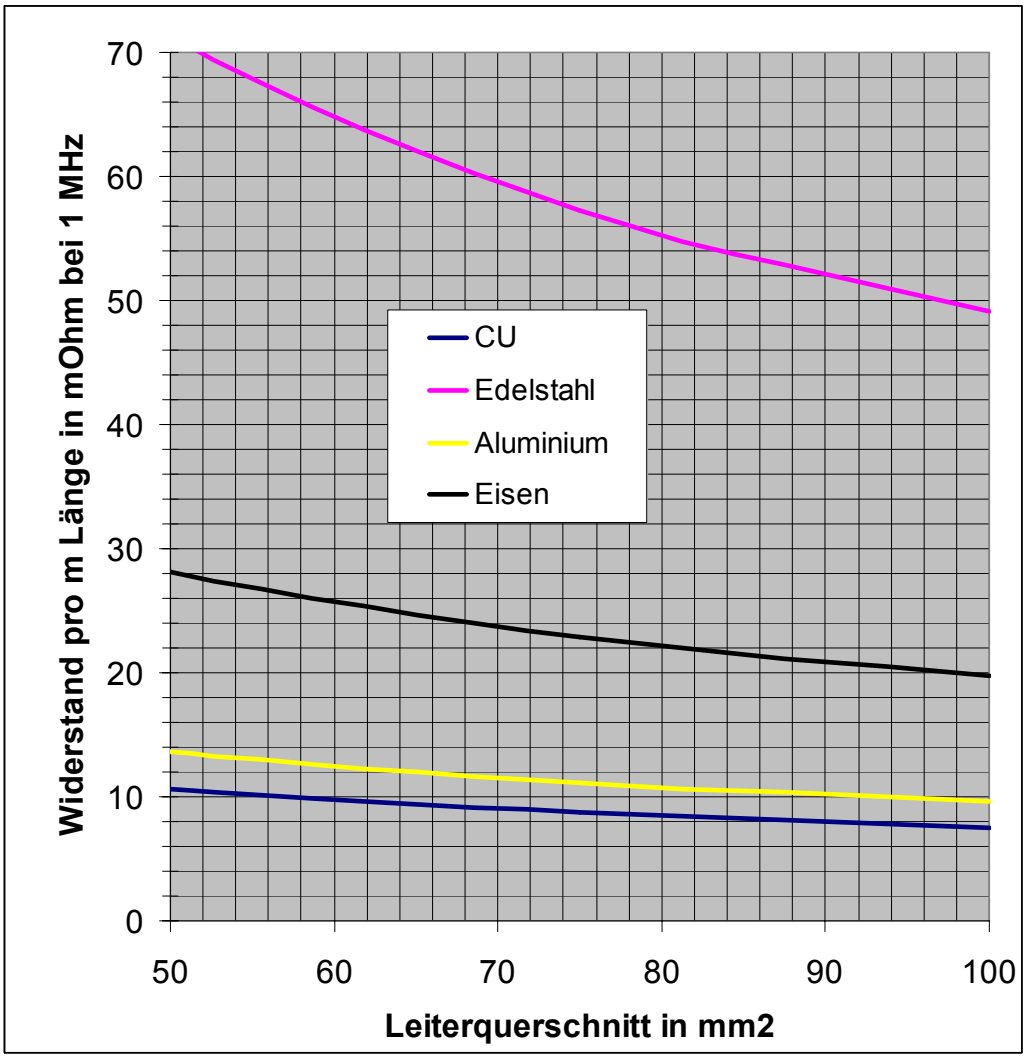


Bild 3.1.3.2 Widerstand von **Rundleitern** aus verschiedenen Materialien unter Berücksichtigung der Stromverdrängung für eine Frequenz von 1 MHz

3.1.4 Topologien von Leitungen

Blitzschutzsysteme setzen sich aus komplexen Leitungssystemen zusammen, die sowohl Laufzeitverhalten als auch elektromagnetische Kopplungen aufweisen. Eine exakte Rechnung ist nur mit einem CAD Programm möglich, dass die Maxwellschen Gleichungen enthält und im Zeitbereich löst. Dabei ist die große Geometrie der Anordnung eine Begrenzung der Rechengenauigkeit wegen der begrenzten Zahl finiter Elemente?
Rechenprogramme sind am Markt, es bedarf einer separaten Analyse dieser Programme und deren Performance.

3.1.5 Gültigkeit der Modellierung von offenen Strukturen durch Wanderwellenleitungen

Dieser Abschnitt konnte im Rahmen der verfügbaren Ressourcen nicht bearbeitet werden. Zur Klärung dieser Frage sind neue Rechenprogramme für die Lösung der Maxwellschen Gleichungen im Zeitbereich erforderlich.

3.2 Erdung

Eine Erdung wird im Allgemeinen immer nur als ohmscher Widerstand angenommen und bei Gleichstrom angegeben, berechnet oder gemessen.
Bei einem Folgestoßstrom muss hingegen das Laufzeitverhalten von Erdern berücksichtigt werden. Ionisierung und andere nichtlineare Effekte werden hier nicht berücksichtigt.

3.2.1 Stab-Erder

a) Modellierung mit konzentrierten Elementen eines Kettenleiters und direkter Einspeisung .

Das folgende Beispiel Bild 3.2.1.1 zeigt die Modellierung eines Staberders mit 55 Gliedern eines Kettenleiters bei einem eingeprägten Folgestoßstrom von 50 kA. Bild 3.2.1.2 zeigt das Ergebnis der Simulation. Die Spannung am Eingang des Kettenleiters fällt weit höher aus, als es nach der Berechnung mit dem Gleichstomwiderstand der Fall wäre. Der stationäre Zustand stellt sich erst nach einigen 10µs ein. Der dynamische Erdungswiderstand fällt auf den aus der Anzahl der Kettenglieder berechneten Wert von **63/51=1,23** Ohm ab. Die Laufzeit des Erders beträgt 1,5µs. Der dynamische Erdungswiderstand lässt sich aus dem Eingangsstrom und der Spannung am Eingang des Kettenleiters berechnen, zeigt allerdings zu Beginn numerische Instabilitäten, so dass die Werte nur ab der gestrichelten Linie in Bild 3.1.2.2 gelten.

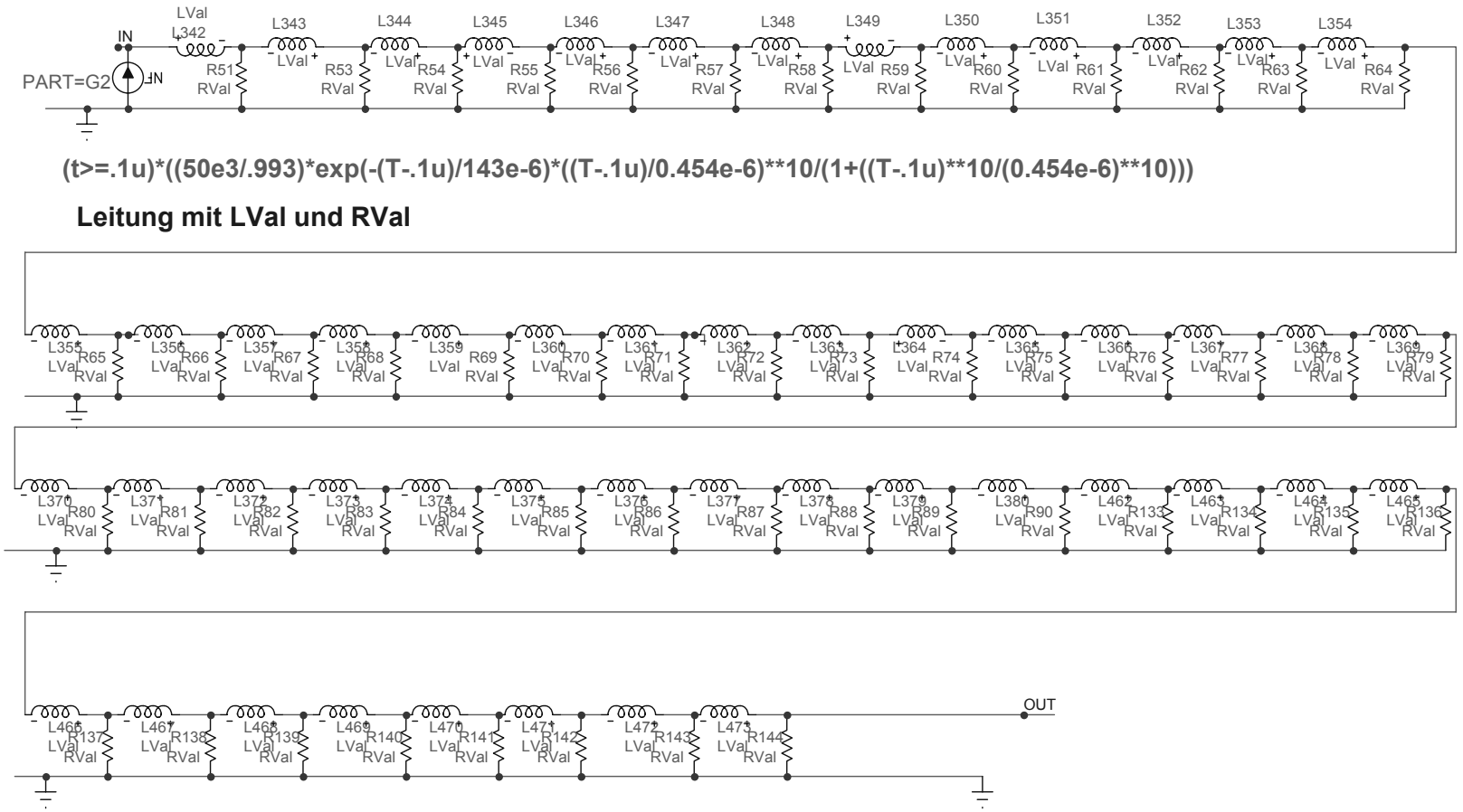


Bild 3.2.1.1 Modell eines Staberders mit einem Kettenleiter aus 51 Gliedern. L´=1uH/m, G`=0,0158S/m entsprechend Ableitungswiderstand von 63Ohm/m im Vergleich mit einem konzentrierten Erder Einspeisung Folgestoßstrom 0,25/100µs, 50 kA. RE hat einen stationären Wert von 1,23 Ohm

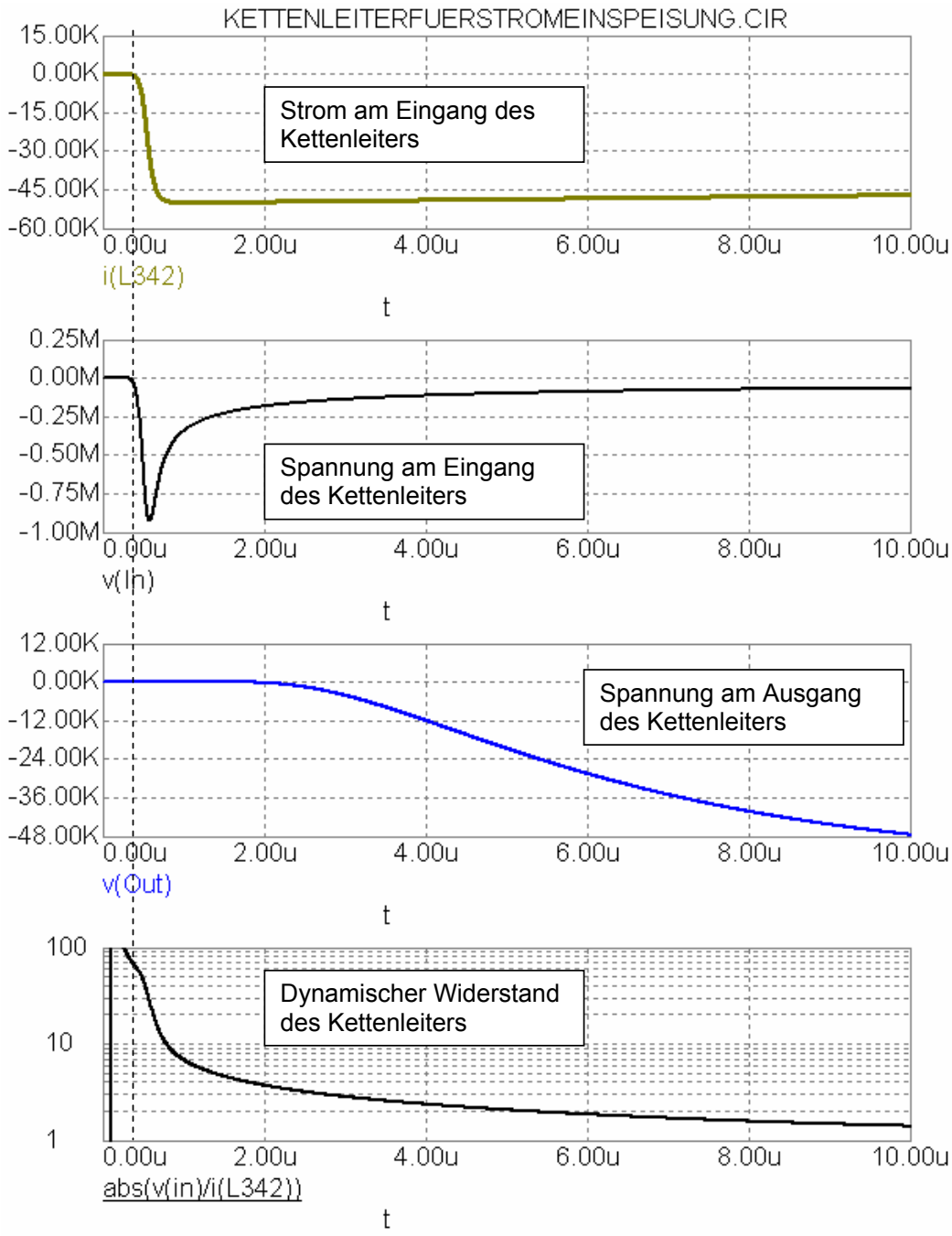


Bild 3.2.1.2 Simulation des Modells in Bild 3.2.1.1 eines Staberders mit einem Kettenleiter aus 55 Gliedern. L´=1uH/m, G`=0,0158S/m entsprechend Ableitungswiderstand von 63Ohm/m. Einspeisung Folgest0ßstrom 0,25/100µs, 50kA. Der Erdungswiderstand hat einen stationären Wert von 1,23 Ohm. Der dynamische Erdungswiderstand beginnt ab der gestrichelten Linie, da bei kleinen Werten numerische Instabilitäten auftreten.

b) Modellierung mit konzentrierten Elementen eines Kettenleiters und Einspeisung .über eine Fangstange, die mit einem abschnittsweise konstanten Wellenwiderstand modelliert wird.

Bild 3.2.1.3 zeigt die Modellierung und auch eine Schaltung zum Vergleich mit einem Erdungswiderstand bestehend aus einem einzelnen Widerstand.
Bild 3.2.1.4 zeigt die Ergebnisse. Gegenüber einem konzentrierten Erdungswiderstand ergeben sich höhere Werte bei einer Modellierung als Kettenleiter.

Welche Unterschiede ergeben sich aus den einzelnen Modellen?
Bild 3.2.1.5 zeigt die unterschiede der Spannungen am Eingang des Erders bei den drei untersuchten Modellen. Es zeigt sich, dass die Erdermodellierung als Kettenleiter wichtig ist, denn dadurch ergeben sich erhebliche Unterschiede gegenüber einer Erdermodellierung mit einem konzentrierten Widerstand.
In dem Zusammenwirken mit der Fangstange ist es allerdings nicht von Bedeutung, die Fangstange als Wanderwellenmodell einzusetzen.

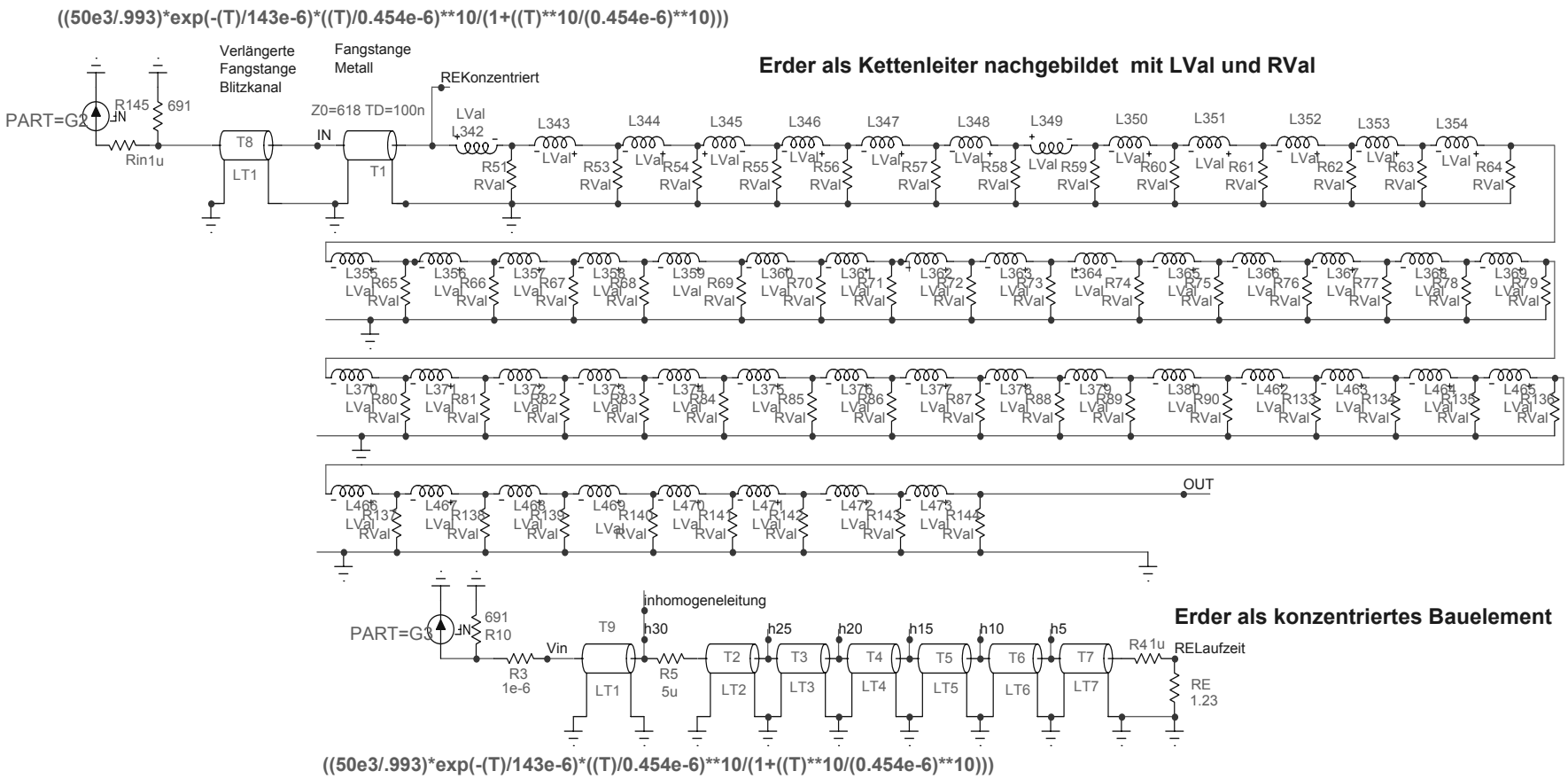


Bild 3.2.1.3 Modell eines Staberders mit einem Kettenleiter aus 51 Gliedern. L´=1uH/m, G`=0,0158S/m entsprechend Ableitungswiderstand von 63Ohm/m im Vergleich mit einem konzentrierten Erder Einspeisung Folgest0ßstrom 0,25/100µs, 50 kA. RE hat einen stationären Wert von 1,23 Ohm

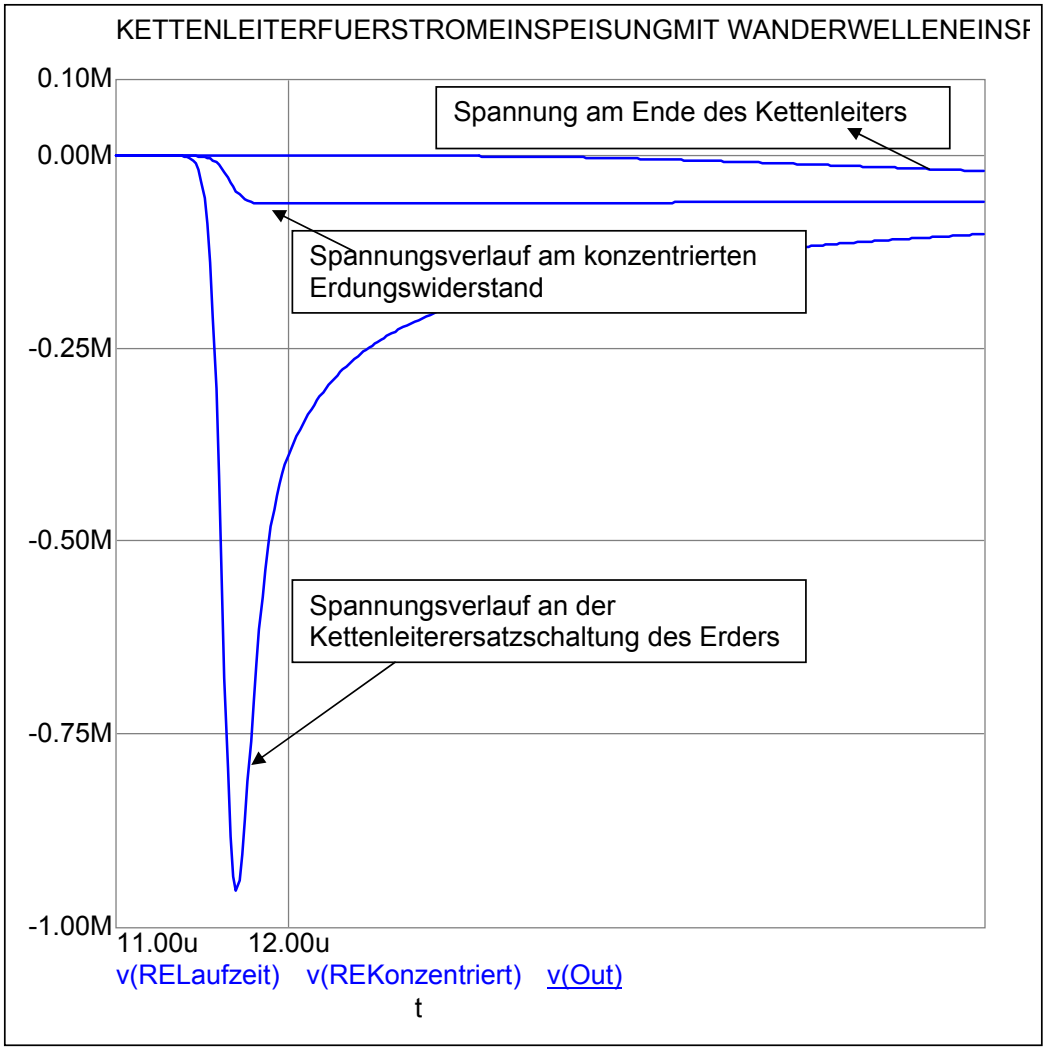


Bild 3.2.1.4 Simulation des Modells in Bild 3.2.1.3 eines Staberders mit einem Kettenleiter aus 55 Gliedern und Einspeisung über eine Fangstange, die mit abschnittsweise konstanten Wellenwiderständen modelliert wurde. . L´=1uH/m, G`=0,0158S/m entsprechend Ableitungswiderstand von 63Ohm/m. Einspeisung Folgest0ßstrom 0,25/100µs, 50 kA.

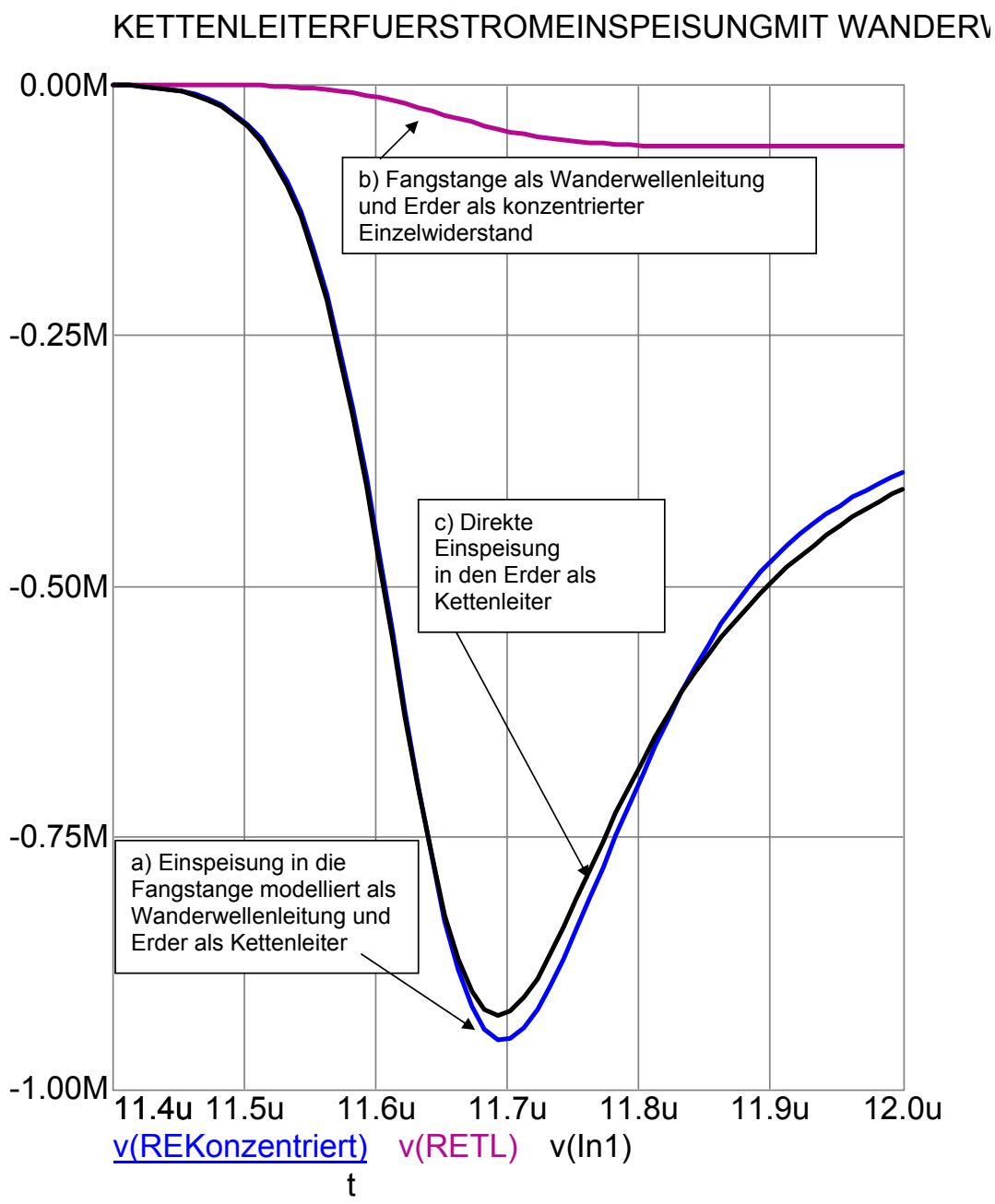


Bild 3.2.1.5 Vergleich der Spannungen am Eingang des Erders unter folgenden Voraussetzungen: 50 kA Folgestoßstrom. Laufzeitbereinigte Darstellung.

a) Fangstange als Wanderwellenleitung und Erder als Kettenleiter
b) Fangstange als Wanderwellenleitung und Erder als konzentrierter Einzelwiderstand
c) Direkte Einspeisung in den Erder als Kettenleiter

3.2.2 Fundamenterder

Ein Modell für Fundamenterder bestehend aus den konzentrierten Elementen der Eisenteile im Beton und der Koppelkapazität zum leitenden Erdreich liegt nicht vor und bleibt Gegenstand weiterer F+E Projekte

3.2.3 Wasserleitungen, Gasleitungen, informationstechnische Leitungen in der Erde

Diese Systeme können ähnlich wie ein Staberder modelliert werden.

3.3 Ableitermodelle für Blitzstrom-und Überspannungsableiter

Modelle für Blitzstrom-und Überspannungsableiter für die Verwendung in Simulationsprogrammen sind vielfach zitiert worden. Allgemein wird die hohe Komplexität und die Instabilität bei der Simulation beklagt. Daher wurde zunächst ein Schaltmodul für extrem steile Spannungsanstiege, wie sie z.B. beim Durchzünden einer N-PE Funkenstrecke an einem nachgeschalteten Blitzstromableiter vorkommen, entwickelt und getestet. Bild 3.3.1 zeigt die Grundschaltung eines solchen Schalters mit der Nachbildung der Lichtbogenbrennspannung einer Funkenstrecke durch eine Batteriespannung oder durch einen Varistor, dessen Restspannung auf die gemessene Restspannung der Funkenstrecke angepasst werden kann.
Bild 3.3.2 zeigt eine Simulation dieser Schaltung mit einer extrem steilen Spannung. Bild 3.3.3 zeigt die Simulation der Grundschaltung mit einem Folgestromimpuls 0,25/100. In beiden Fällen arbeitet die Schaltung schnell, stabil und zuverlässig. Die Berücksichtigung einer allfälligen Stoßkennlinie ist Gegenstand weiterer Arbeiten. Die bisher verwendeten Modelle haben zwar die Stoßkennlinie berücksichtigt, waren aber in der Praxis zu instabil. Daher muss auch hier eine einfache zuverlässige Lösung gefunden werden. In der Praxis kann man aber ausgehen von der dem Hersteller bekannten Abhängigkeit der Ansprechspannung von der Steilheit der Stoßspannung eine entsprechende Korrektur der Ansprechspannung im Modellvornehmen.

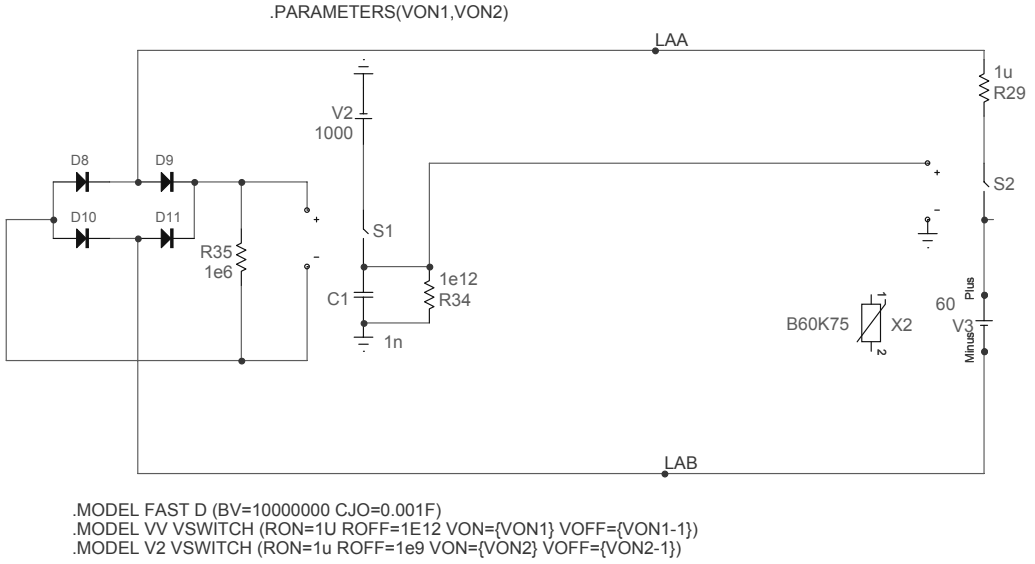


Bild 3.3.1 Grundschaltung für die Modellierung von Ableitern mit Funkenstrecken.

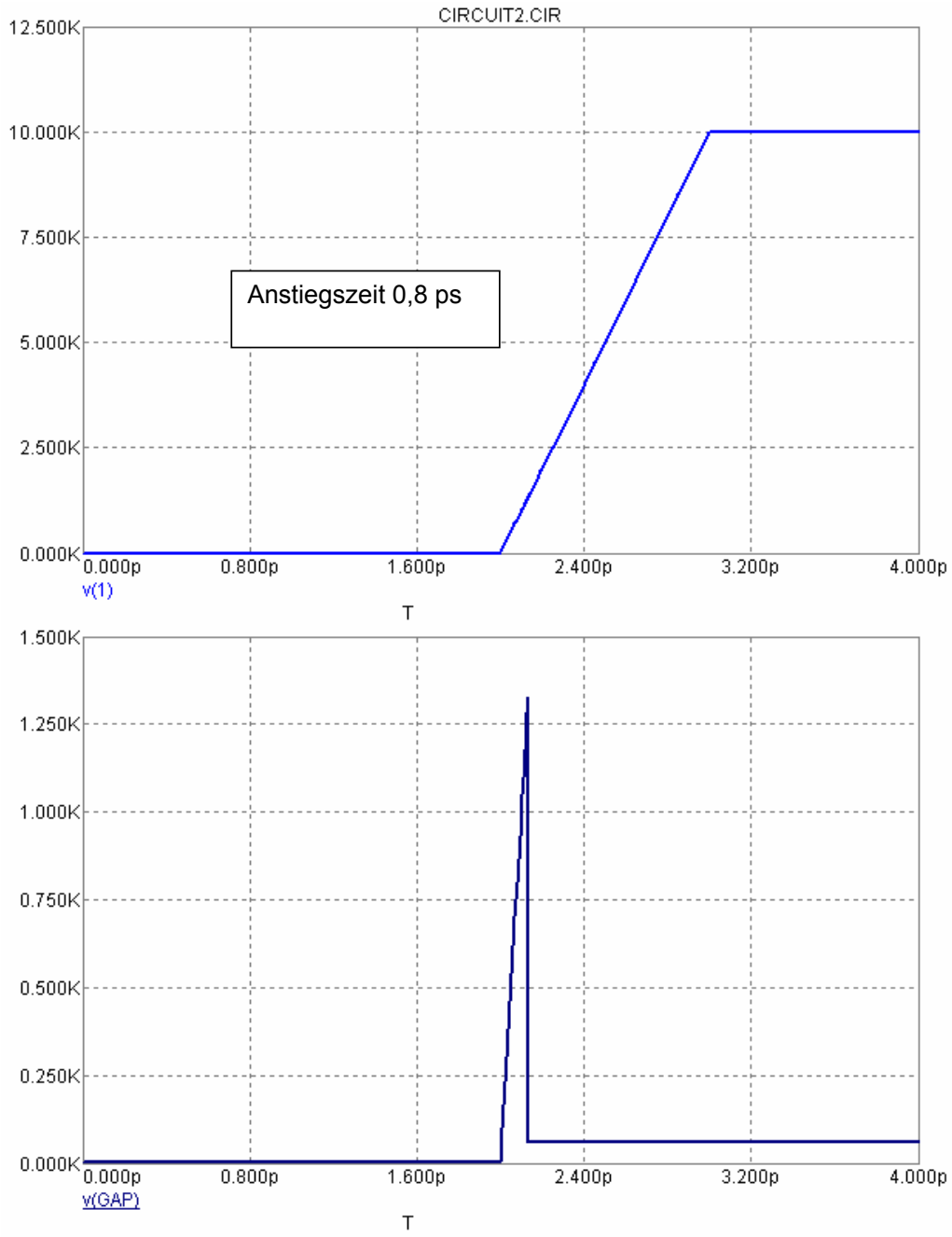


Bild 3.3.2 Simulation der Grundschaltung in Bild 3.3.1 mit einem Spannungsimpuls mit einer Anstiegszeit im ps Bereich. Ansprechspannung der Funkenstrecke: 1,3 kV.

Bild 3.3.3 Simulation der Grundschaltung in Bild 3.3.1 mit einem Folgestromimpuls 0,25/100 mit 10 kA wobei die Restspannung der Funkenstrecke im Modell durch einen Varistor nachgebildet wurde. Ansprechspannung der Funkenstrecke: 1,3 kV

3.4 Zähler, FI und andere im Strompfad vorhandene Geräte

Zähler
Einige Zähler wurden untersucht. Dabei wurden die Impedanzen gemessen. Aus den Werten in Bild 3.4.1 und 3.4.2 geht hervor,dass die Spannungsabfälle an diesen Geräten bei Folgestromimpulsen mit 50 kA entsprechend einer Steilheit von 200kA/µs und einer symmetrischen Stromaufteilung auf alle Stromzweige gerade noch imBEreich von 5 kV bleiben und keine Zerstörungen hervorrufen. Ob EMVProbleme auftreten, bleibt offen. Eine Zerstörung wuurde hingegen mit 10/350 Impulsen überprüft. Dabei hieleten die meisten der getesteten Zählerden Belastungen stand.

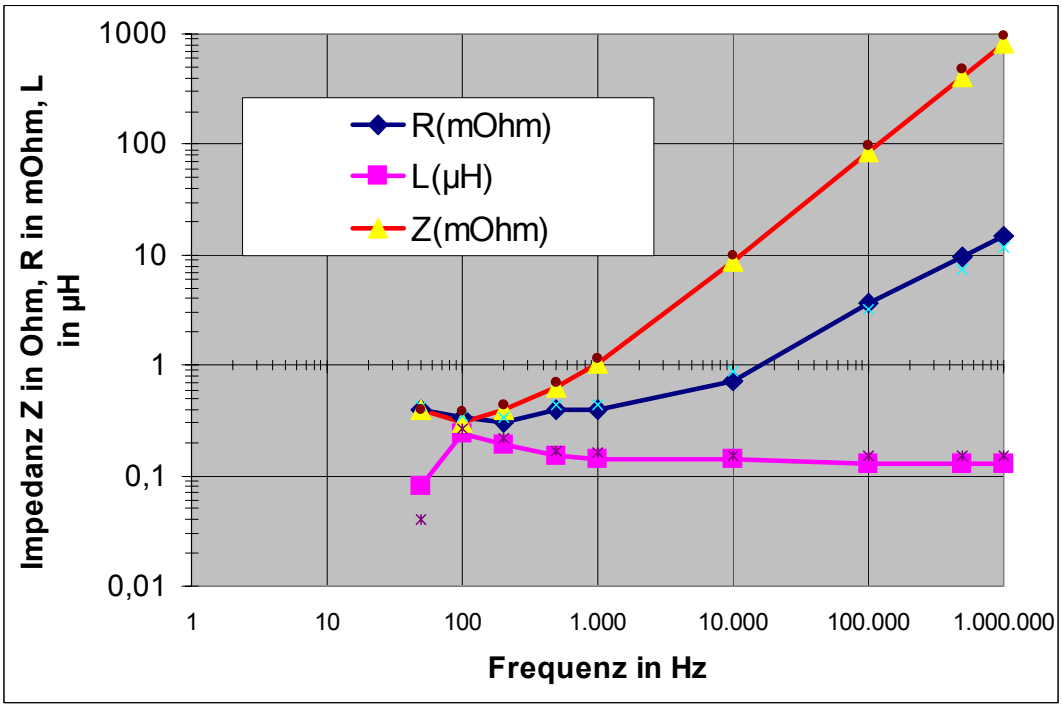


Bild 3.4.1 Impedanzen eines elektronischen Zählers im Stromzweig

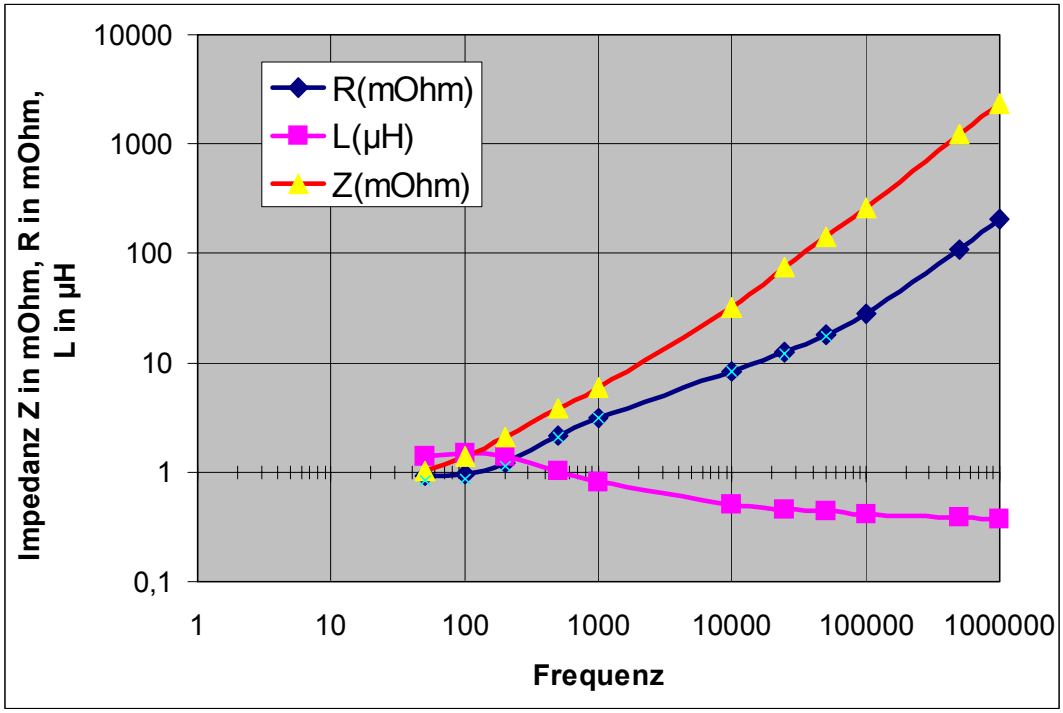


Bild 3.4.2 Impedanzen eines halbelektronischen Zählers im Stromzweig

FI und andere Geräte wurden bisher nicht untersucht.

3.5 Magnetische Kopplung von magnetisch und galvanisch gekoppelten Leitern

Bei einem Folgestoßstrom ist wegen des großen di/dt die magnetische Kopplung in Leiterschleifen zu berücksichtigen. Solche Leiterschleifen kommen in Installationen vor, in denen Blitzstrom-und Überspannungsableiter in einem endlichen Abstand voneinander eingesetzt werden. Dabei ist die Kopplung rein induktiv (transformatorisch) oder galvanisch-induktiv, wie in Bild 3.5.1 dargestellt. Die Modellierung kann mit Hilfe von Simulationsprogrammen erfolgen, wie in 3.5.1 dargestellt. Die Spannung in einer offenen Schleife ist bei der galvanisch-induktiven Kopplung größer als bei der rein transformatorischen Kopplung. Dabei ist die Impedanz des galvanischen Kopplungszweiges entscheidend, d.h. die Leitung muss niederinduktiv ausgeführt werden. Bild 3.5.2 zeigt die Ergebnisse der Simulation.

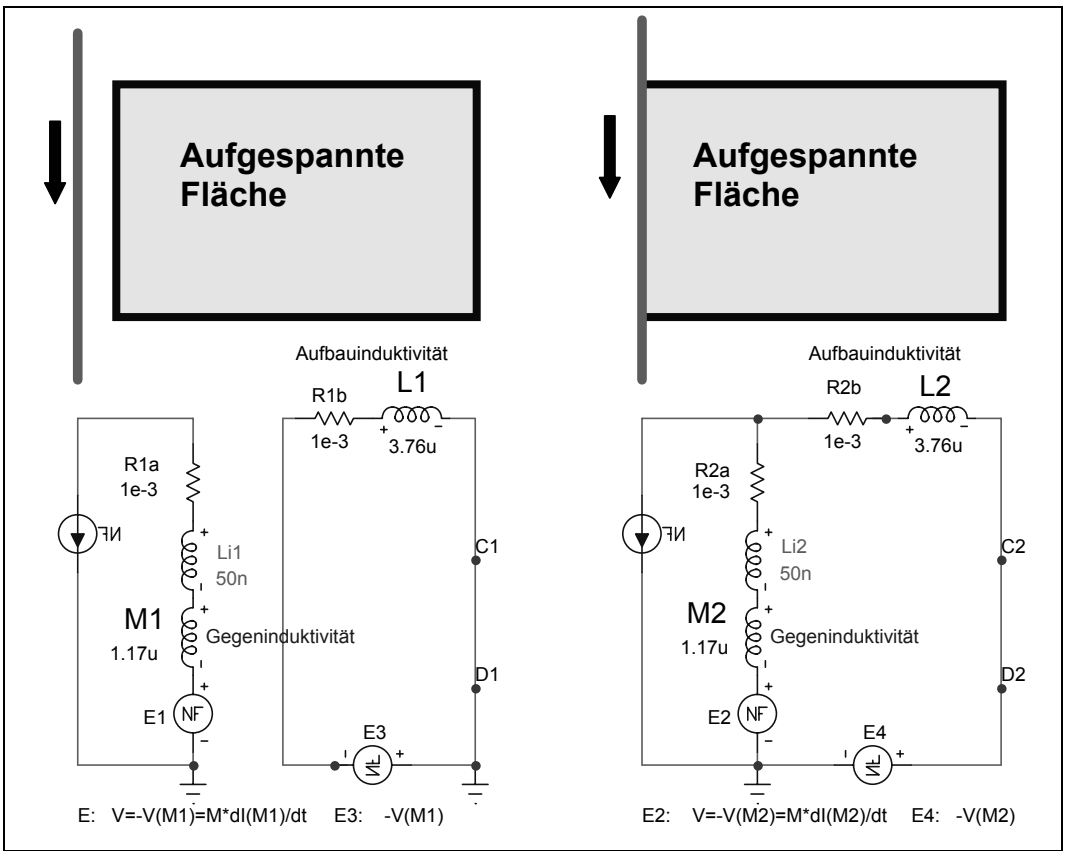
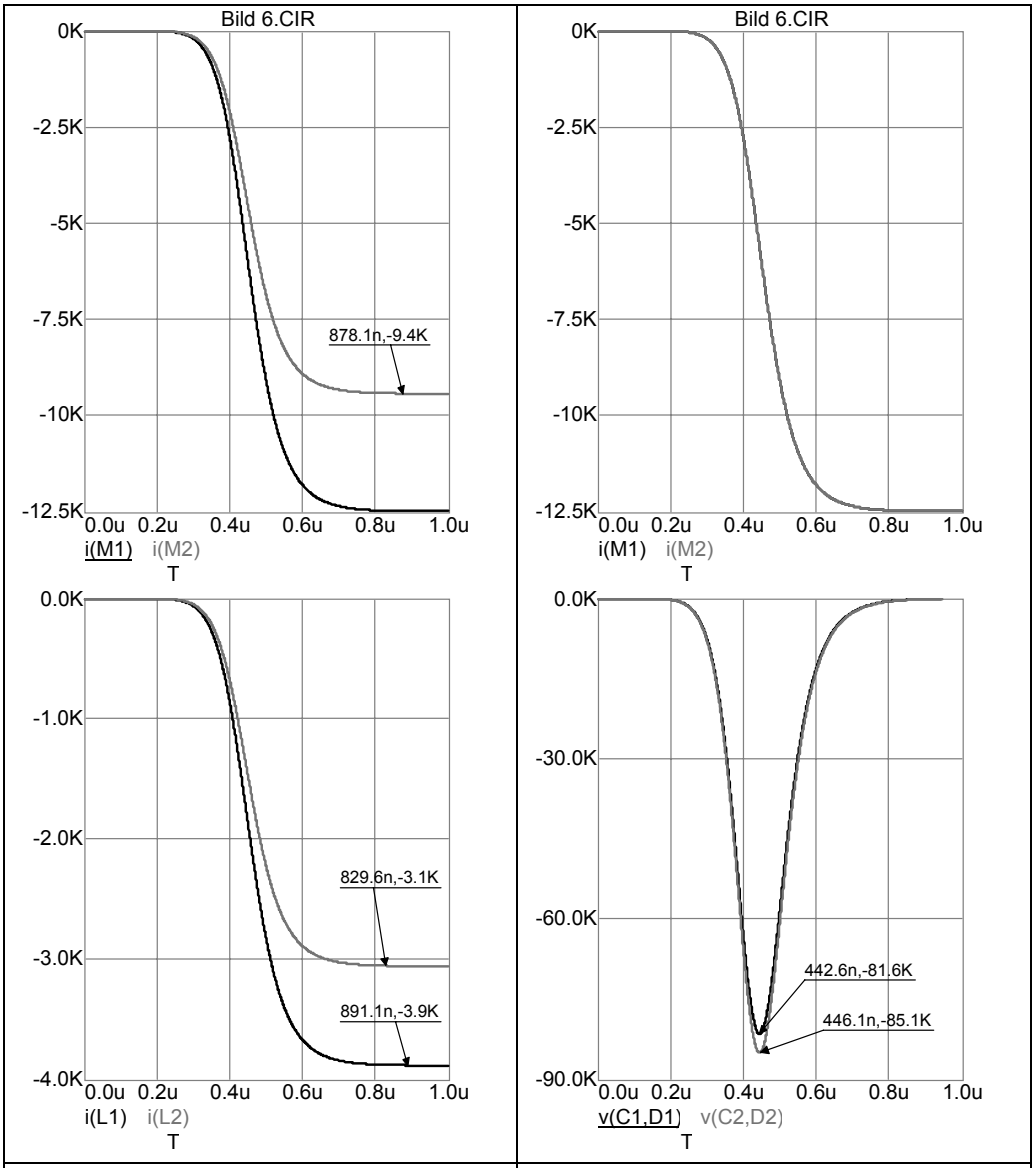


Bild 3.5.1 Modellierung magnetischer Kopplungen mit einer induktiven Kopplung in eine benachbarte Schleife und eine galvanisch-induktive Kopplung in eine elektrisch verbundene Schleife, dargestellt für den Fall der kurzgeschlossenen Schleife.



Induktive Kopplung	**Galvanisch-induktive Kopplung**
Stromverläufe in 3.5.1 **für kurzgeschlossene Schleifen**.	Strom- und Spannungsverläufe in 3.5.1 **für offene Schleifen**.

Bild 3.5.2 Ergebnis eines Simulationsbeispiels der Schaltung in 3.5.1 für den Fall der kurzgeschlossenen und der offenen Schleife. Eingespeister Folgestoßstrom 12,5 kA; 0,25/100µs.

3.5.1 Schutzpegel von Blitzstromableitern

Blitzstromableiter sind mit dem galvanisch-induktiven Modell zu beschreiben. Für die praktische Ausführung ist die Anschlussleitung Gegenstand vieler Diskussionen bei der Realisierung der normkonformen Anschlüsse [6]. Im Anhang C von [6] ist eine

Zuleitung zum Ableiter von je 0,5 m angegeben, im Entwurf [7] wird je 0,25 m angegeben. In der Praxis der Installation werden oft Schleifen eingebracht, die eine zusätzliche Induktivität verursachen. Die sogenannte V-Verdrahtung bietet hier Vorteile. Einen Vergleich einer Installation mit einem Anschluss zum B-Ableiter bei direkter und bei einer V-förmigen Verbindung nach [6] zeigt Bild 3.5.1.1 Dort wird die Spannung an einem Sekundärgerät (offene Klemmen, kein C-Schutz) bestimmt. Dabei wird angenommen, dass die Leitungslänge zum B-Ableiter gleich bleibt, jedoch durch unterschiedliche Verlegung der Leitung (Schleifenbildung) unterschiedliche Induktivitäten wirksam werden. Die Gegeninduktivität M bzw. M1 wird dabei als unverändert angenommen. Der Idealfall ist eine gerade durchgehende Leitung mit einer verbleibenden inneren Induktivität von 50nH/m. Tabelle 2 zeigt das Ergebnis. Es fällt auf, dass die Spannung an den Schienenanschlüssen mit abnehmender Induktivität der Zuleitung zu dem Blitzstromableiter sinkt. Die Spannung am Sekundärgerät bleibt jedoch davon unabhängig, wenn eine V-förmige Konstruktion der Ableiterklemmen verwendet wird. Allerdings wird die Spannung am Sekundärgerät auch bei Verwendung von V-förmigen Anschlussklemmen durch die magnetisch induzierte Spannung in die aufgespannte Fläche bestimmt, so dass immer ein Überspannungsableiter parallel zum Sekundärgerät zu schalten ist.

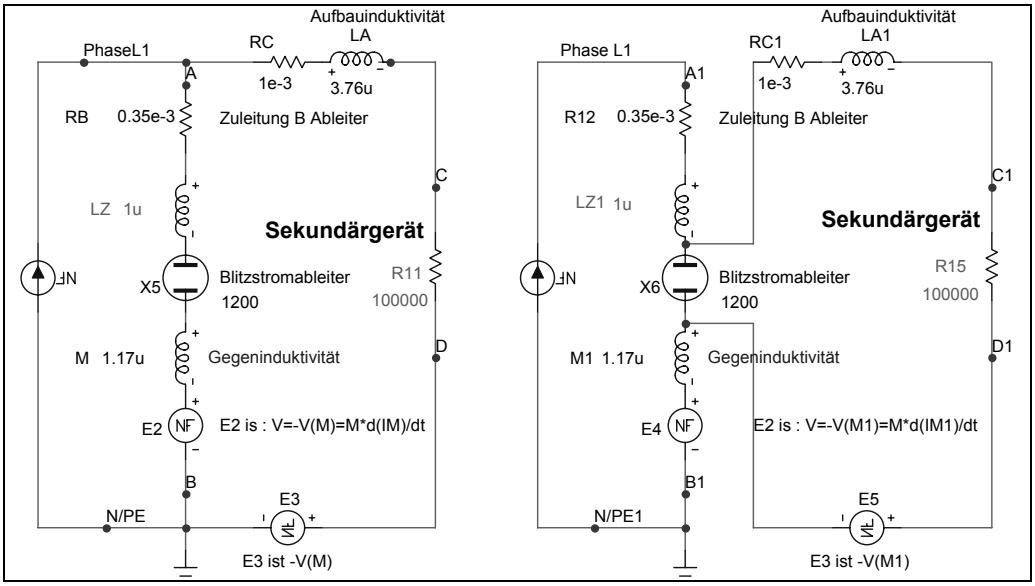


Bild 3.5.1.1 Vergleich der Spannung an einem Sekundärgerät in einer Installation mit einem Blitzstromableiter bei einem Folgestoßstrom von 12,5 kA. Schleifenabmessungen: 1x1m.

3.5.2 Schutzpegel von Blitzstrom-und Überspannungsableitern

Zum wirksamen Schutz eines Sekundärgerätes muss ein Überspannungsableiter parallel zum Sekundärgerät geschaltet werden, damit beim Blitzschutzpotentialausgleich mit einem Blitzstromableiter die Wirkung des magnetischen Feldes beherrscht wird. Wird in Bild 3.5.1.1 ein Überspannungsableiter B40K275 parallel zu dem Sekundärgerät geschaltet, ergibt sich die in Tabelle 3.5.2.1 gezeigte Stromaufteilung und die Spannung am Sekundärgerät. Der Blitzstromableiter übernimmt bei V-förmigem Anschluss den vollen Strom. Der

Überspannungsableiter wird bei V-förmigem Anschluss mit geringerem Strom belastet als bei direktem Anschluss und zeigt einen kleineren Schutzpegel. Um den Effekt der magnetischen Einkopplung zu verdeutlichen, sind in Tabelle 3.5.2.2 die Werte ohne Berücksichtigung der magnetischen Kopplung in Klammern dargestellt. Insbesondere ist zu beachten, dass der Überspannungsableiter durch die magnetische Kopplung mit einem Strom von 2,6 kA beansprucht wird, der Belastung jedoch gewachsen ist.

Zuleitungsinduktivität Anschluss zum Blitzstromableiter (Lz in Bild 8)	Spannung an den Zuleitungen zum Blitzstromableiter Phase L1/NPE	Spannung am Sekundärgerät Spannung an C,D bzw. C1,D1 in Bild 8	
		Konventionelle Verbindung	V-förmige Verbindung
µH	kV	kV	kV
1	70	152	82
0,5	35	116	82
0,25	17,7	99,2	82
0,125	9	90,5	82
0,05	3,8	85,4	82

Tabelle 3.5.2.1 Spannungen an einem Sekundärgerät, das über eine rechteckförmige Schleife von 1x1 m parallel zu einem Blitzstromableiter liegt. Eingespeister Folgestoßstrom 12,5 kA. Schleifenabmessung 1x1m.

		Konventionelle Verbindung	V-förmige Verbindung
Stromscheitel im Blitzstromableiter	kA	8,72 (11,2)	12,5 (12,42)
Stromscheitel im Überspannungsableiter	kA	3,78 (1,3)	2,62 (0)
Spannungsscheitel am Sekundärgerät	V	1160 (884)	1010 (500)

Tabelle 3.5.2.2 Strombelastung der Ableiter und Spannungen an einem Sekundärgerät, das über eine rechteckförmige Schleife von 1x1 m parallel zu einem Blitzstromableiter liegt und durch einen Überspannungsableiter (B40K275) geschützt ist. Schleifenabmessung 1x1m. Eingeprägter Folgestoßstrom 12,5 kA. Die Werte in Klammern geben die Werte ohne Berücksichtigung der magnetischen Einkopplung an.

4 Fallstudien

Zusammenfassung
Die Modellierung einer Folgestoßstromeinspeisung in den PE-Leiter unter Berücksichtigung einer N-PE Funkenstrecke und N-Leiterverbindung zum Trafo zeigte folgende Ergebnisse.

- Bei Verwendung von Wanderwellenleitungen für die Ableitung und Erder zeigen die Stromverläufe Wanderwellenschwingungen, der eingeprägte Strom bleibt hingeben unverändert in seiner Form.
- Die Spannung gegen ferne Erde ist wesentlich höher bei Verwendung von Wanderwellenleitern, insbesondere bei der Modellierung des Erders als Erderkettenleiter.
- Der Spannungsanstieg an der N-PE-Funkenstrecke ist bei allen Simulationen im Bereich von 50-70 ns und damit deutlich steiler als eine 1,2/50 Stoßspannung.
- Die Strombeanspruchung der N-PE-Funkenstrecken ist unabhängig davon, ob die Fangstange mit einer Wanderwellenleitung modelliert wird.
- Gegenüber einer Beanspruchung mit 10/350 werden die N-PE-Funkenstrecken mit hochfrequenten Schwingungen beansprucht, wenn der Erder als Wanderwellenerder durch ein Kettenleitermodell nachgebildet wird.

4.1 Einspeisung in ein TT-Netz

4.1.1 Verhalten eines N-PE Blitzstromableiters.

In dieser Studie soll die Funktion eines Blitzstromableiters als N-PE Funkenstrecke zwischen PE und N unter Berücksichtigung der Modelle für die Ableitung, die Erdung und die Verbindung des N-Leiters zum Trafo untersucht werden.
Das vollständige TT-Netz wird danach schrittweise eingeführt und untersucht

4.1.1.1 Erder als ohmscher Widerstand

Bild 4.1.1.1.1 zeigt dazu eine Schaltung, in der die Ableitung durch eine Leitung mit einem abschnittsweise konstanten Wellenwiderstand nach 3.2.1 nachgebildet ist. Die Verbindungsleitung zum Trafo als N-Leiter wird durch eine Leitung mit einem Wellenwiderstand von 100 Ohm mit einer Laufzeit von 500ns nachgebildet. Die Erder werden im ersten Schritt noch als konventionelle Erder mitrein ohmschen Widerständen modelliert. Die Berücksichtigung von B-Ableitern in den Phasen erfolgt im nächsten Kapitel.

Bild 4.1.1.1.2 zeigt das Ergebnis der Simulation. Der Strom fließt zunächst durch den Anlagenerder da der Betriebserder durch die Leitung zum Trafo entkoppelt ist. Nach Abklingen der Wanderwellenvorgänge stellt sich die den ohmschen Widerständen entsprechende Stromaufteilung ein.
Der Strom in Der NPE-Funkenstrecke i(BNPE) wird mit positivem Vorzeichen von N nach PE gezählt entspricht dem Strom im Betriebserder.
Der Spannungsverlauf an der N-PE Funkenstrecke ist in Bild 4.1.1.1.3 mit hoher Zeitauflösung dargestellt. Die Spannung steigt rasant mit einer Anstiegszeit von 53 ns.

Die Spannung des Neutralleiters bzw des PE gegen Ferne Erde erreicht einen Wert von 250kV.

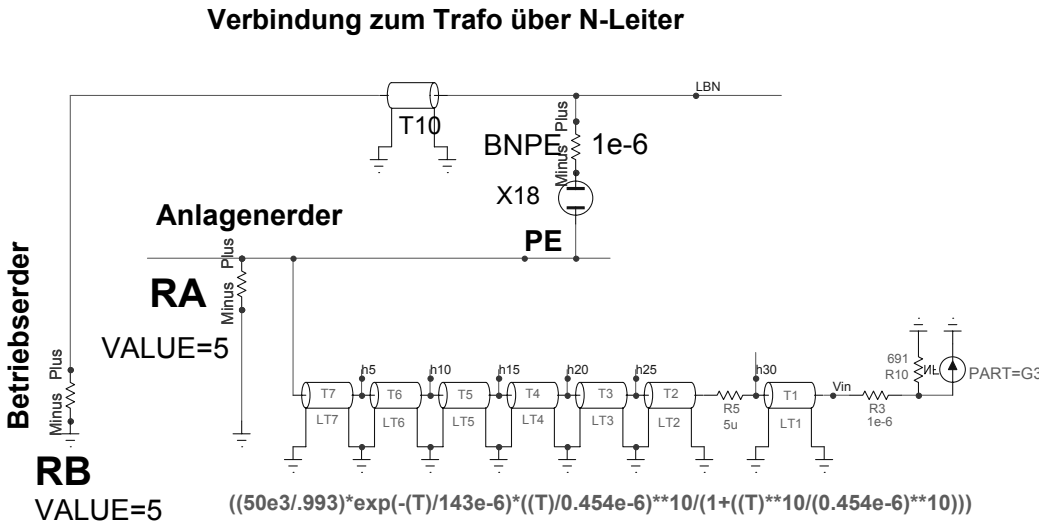


Bild 4.1.1.1.1 Schaltung in der die Ableitung durch eine Leitung mit einem abschnittsweise konstanten Wellenwiderstand nach Abschnitt 3.1.2 und einer Laufzeit von 100 ns nachgebildet ist. Die Verbindungsleitung zum Trafo als N-Leiter wird durch eine Leitung mit einem Wellenwiderstand von 100 Ohm mit einer Laufzeit von 500ns nachgebildet. Der eingespeiste Folgestoßstrom 0,25/100 hat einen Scheitelwert von 50 kA.
Erdungswiderstände : Anlagenerder ohmsch 5 Ohm , Betriebserder ohmsch 5Ohm.

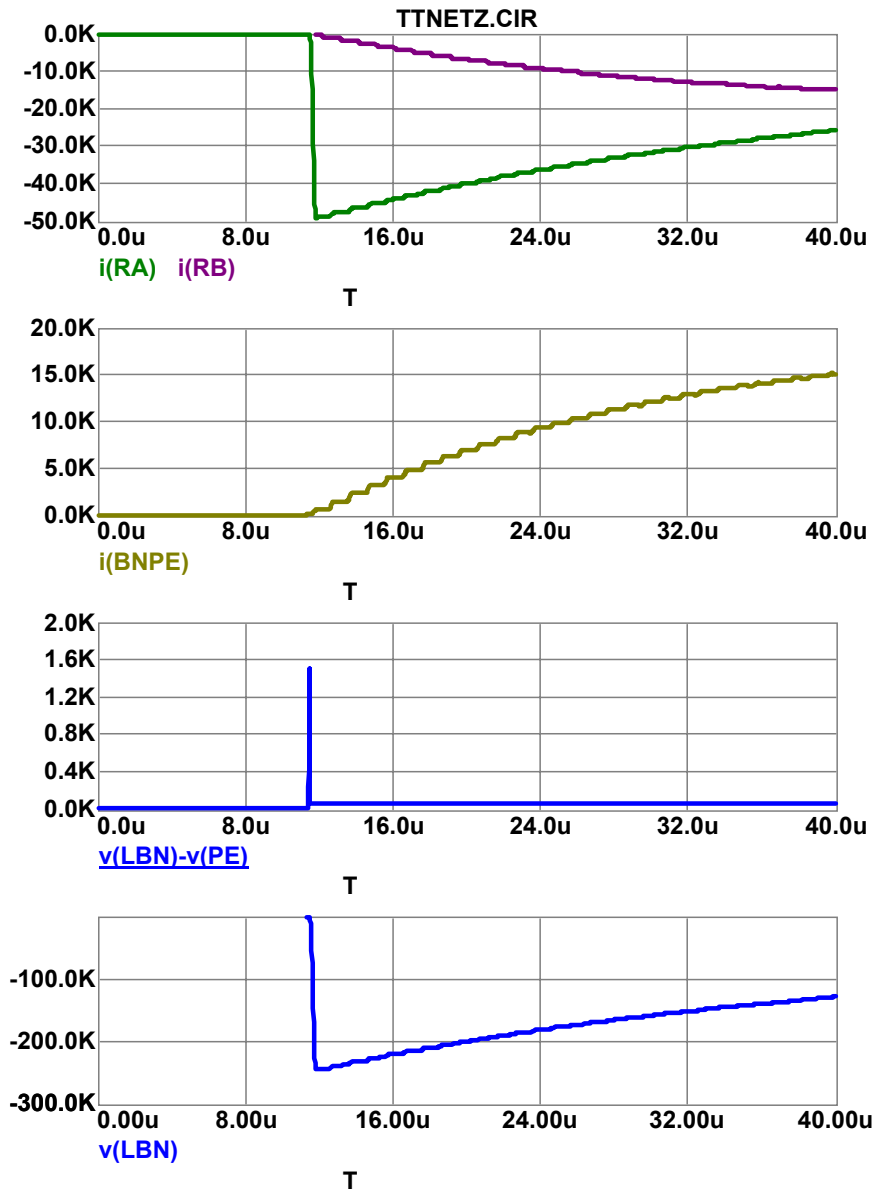


Bild 4.1.1.1.2 Ergebnis der Simulation der Schaltung in Bild 4.1.1.1.1. Eingespeister Folgestoßstrom 0,25/100 mit 10 kA

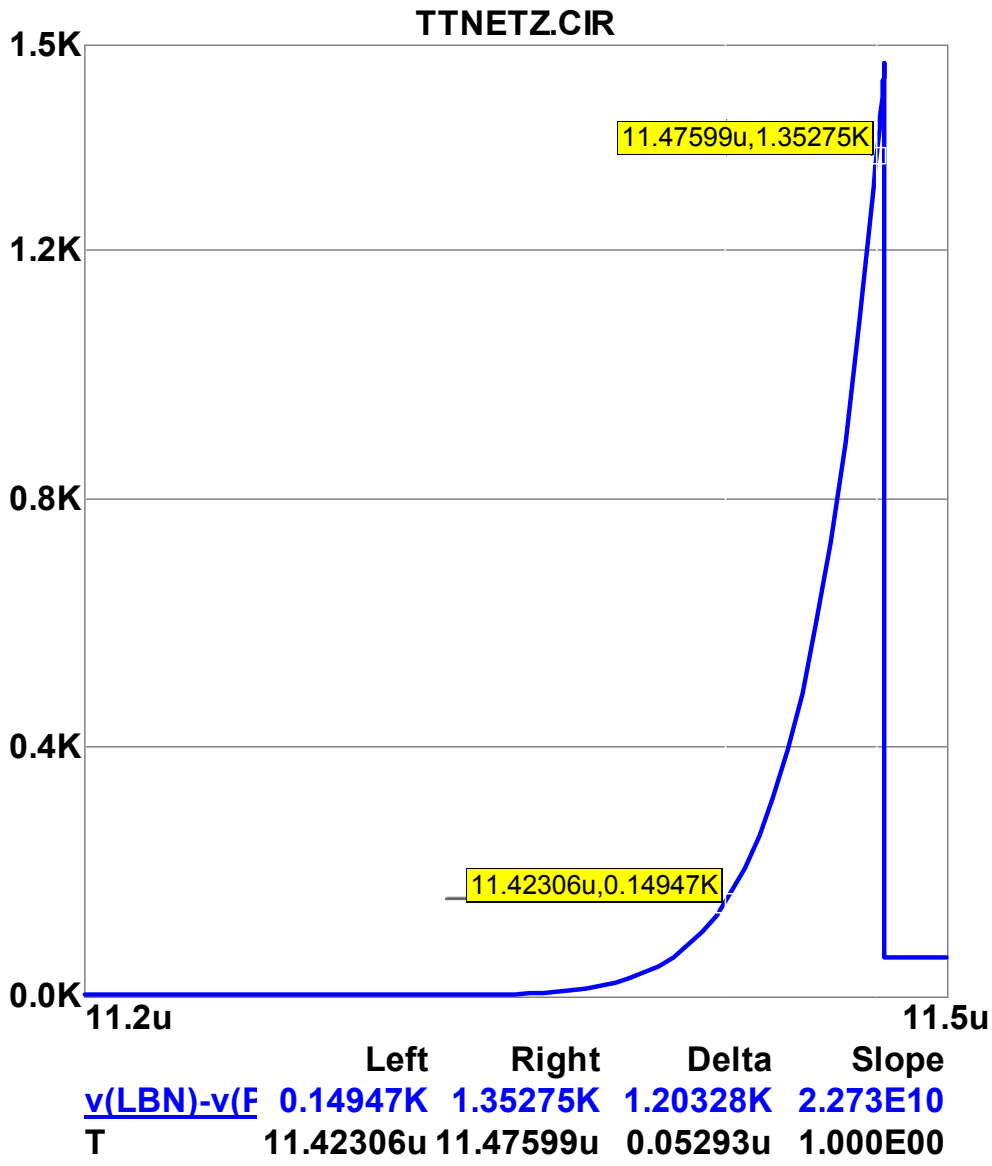


Bild 4.1.1.1.3 Ergebnis der Simulation der Schaltung in Bild 4.1.1.1.1 Aufgelöste Darstellung der Spannung an der N-PE Funkenstrecke. Eingespeister Folgestoßstrom 0,25/100 mit 10 kA. Anstiegszeit der Spannung an der N-PE Funkenstrecke: 53 ns.

4.1.1.2 Erder als Wanderwellenleitung

Bild 4.1.1.2.1 zeigt dazu eine Schaltung, in der die Ableitung durch eine Leitung mit einem abschnittsweise konstanten Wellenwiderstand nach 3.2.1 nachgebildet ist. Die Verbindungsleitung zum Trafo als N-Leiter wird durch eine Leitung mit einem Wellenwiderstand von 100 Ohm mit einer Laufzeit von 500ns nachgebildet. Die Erder werden durch die in Abschnitt 3 eingeführten Kettenleiter modelliert, wobei beide Erder einen Gleichstromwiderstand von 5 Ohm aufweisen. Die Berücksichtigung von B-Ableitern in den Phasen erfolgt im nächsten Kapitel.

Bild 4.1.1.2.2 zeigt das Ergebnis der Simulation. Der Strom fließt zunächst durch den Anlagenerder da der Betriebserder durch die Leitung zum Trafo entkoppelt ist. Nach Abklingen der Wanderwellenvorgänge stellt sich die den ohmschen Widerständen entsprechende Stromaufteilung ein.
Der Strom in der NPE-Funkenstrecke i(BNPE) wird mit positivem Vorzeichen von N nach PE gezählt entspricht dem Strom im Betriebserder, wie im Falle mit ohmschen Erderwiderständen.
Der Spannungsverlauf an der N-PE Funkenstrecke ist in Bild 4.1.1.2.3 mit hoher Zeitauflösung dargestellt. Die Spannung steigt rasant mit einer Anstiegszeit von 40 ns, also geringfügig steiler als im Falle der Erder mit ohmschen Widerständen.

Die Spannung des Neutralleiters bzw des PE gegen Ferne Erde erreicht einen Wert von 1750 kV gegenüber 250kV im Falle der Modellierung der Erder mit ohmschen Widerständen.

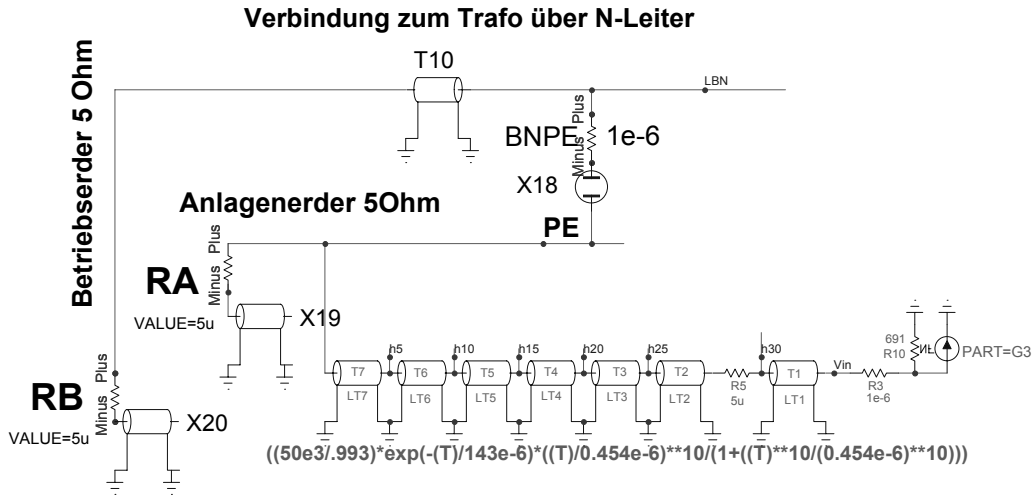


Bild 4.1.1.2.1 Schaltung, in der die Ableitung durch eine Leitung mit einem abschnittsweise konstanten Wellenwiderstand nach Abschnitt 3.2.1 nachgebildet ist. Die Verbindungsleitung zum Trafo als N-Leiter wird durch eine Leitung mit einem Wellenwiderstand von 100 Ohm mit einer Laufzeit von 500ns nachgebildet. Die Erder werden durch die in Abschnitt 3 eingeführten Kettenleiter modelliert, wobei beide Erder einen Gleichstromwiderstand von 5 Ohm aufweisen.
Wichtig: Hier sind die beiden Erder durch ein Kettenleitermodell nachgebildet, siehe 3.2.1. Das Kettenleiterschaltbild wurde durch ein Makro dargestellt.

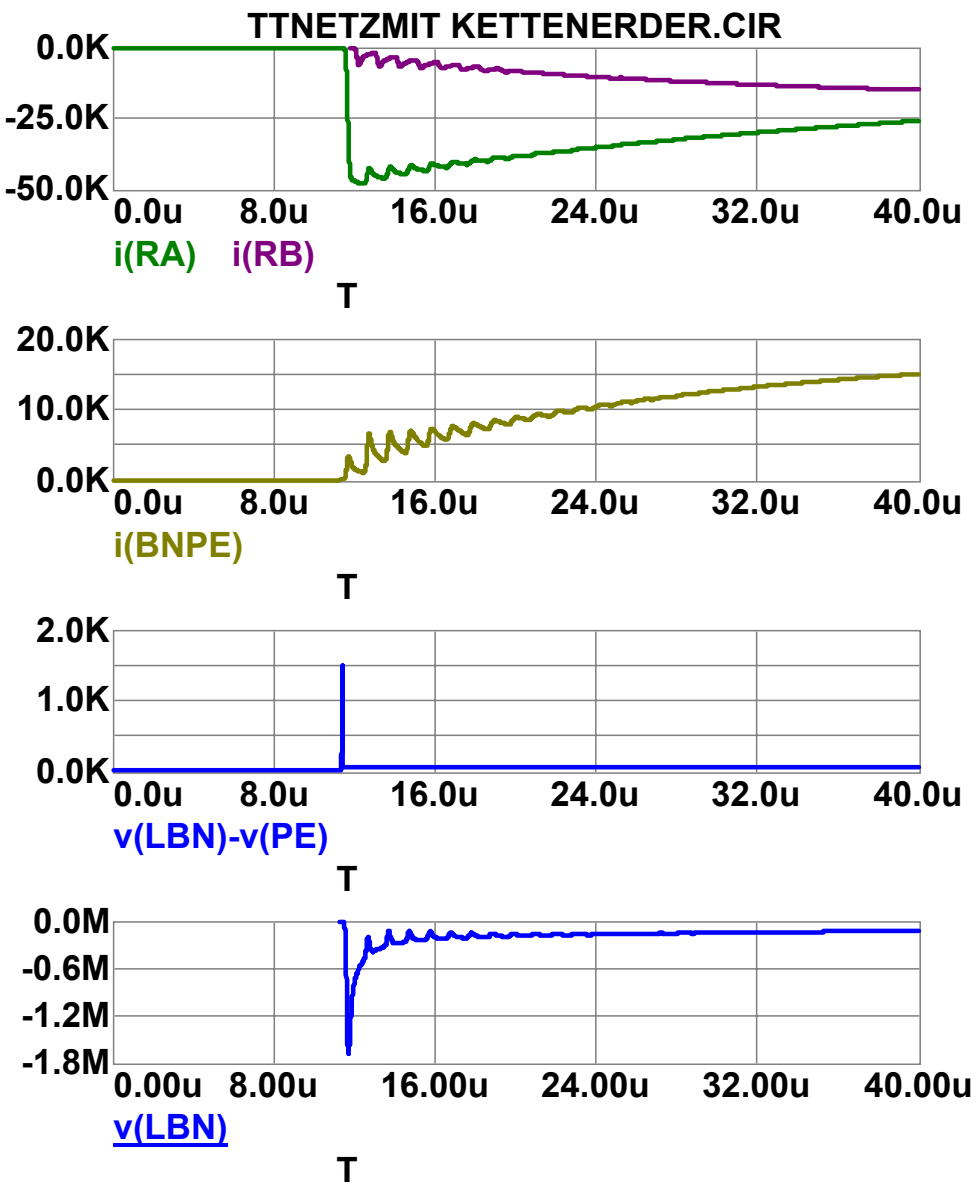


Bild 4.1.1.2.2 Ergebnis der Simulation der Schaltung in Bild 4.1.1.2.1. Eingespeister Folgestoßstrom 0,25/100 mit 10 kA

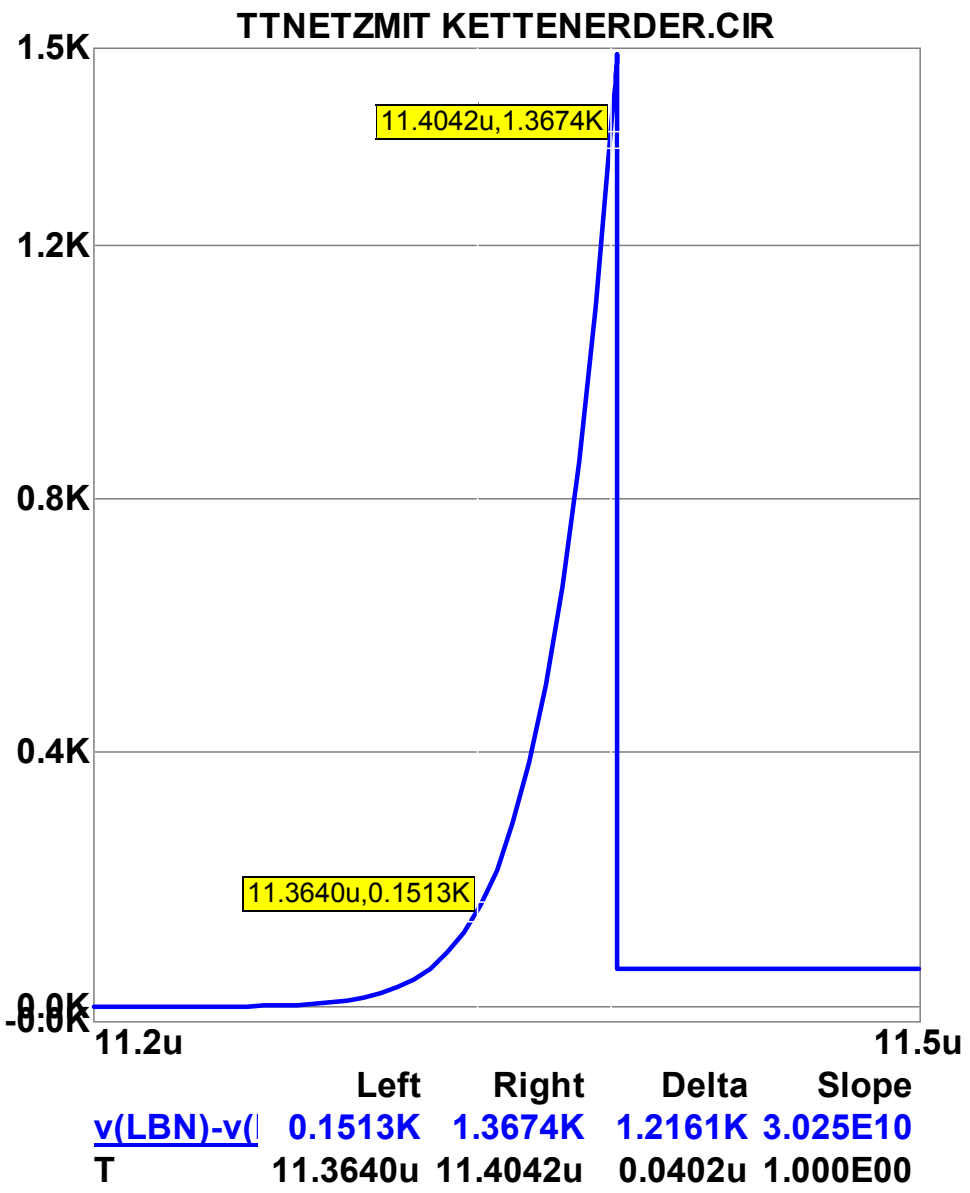


Bild 4.1.1.2.3 Ergebnis der Simulation der Schaltung in Bild 4.1.1.2.1 Aufgelöste Darstellung der Spannung an der N-PE Funkenstrecke. Eingespeister Folgestoßstrom 0,25/100 mit 10 kA. Anstiegszeit der Spannung an der N-PE Funkenstrecke: 40 ns

4.1.1.3 Vergleich der Ableitung mit und ohne Wanderwellenmodelierung bei einem Erdermodell als Kettenleiter

Bild 4.1.1.3.1 zeigt beide Schaltungen im Vergleich. Es soll festgestellt werden, ob die Wanderwellenmodellierung in dem Beispiel wirklich deutliche Unterschiede in den Resultaten gibt.
Die Ergebnisse zeigt Bild 4.1.1.3.2 und 4.1.1.3.3. Die Spannungen am Ableiter unterscheiden sich nur unwesentlich in der Anstiegszeit (40 ns /40ns)
Die Ströme in der N-PE-Funkenstrecke sind in beiden Fällen gleich.

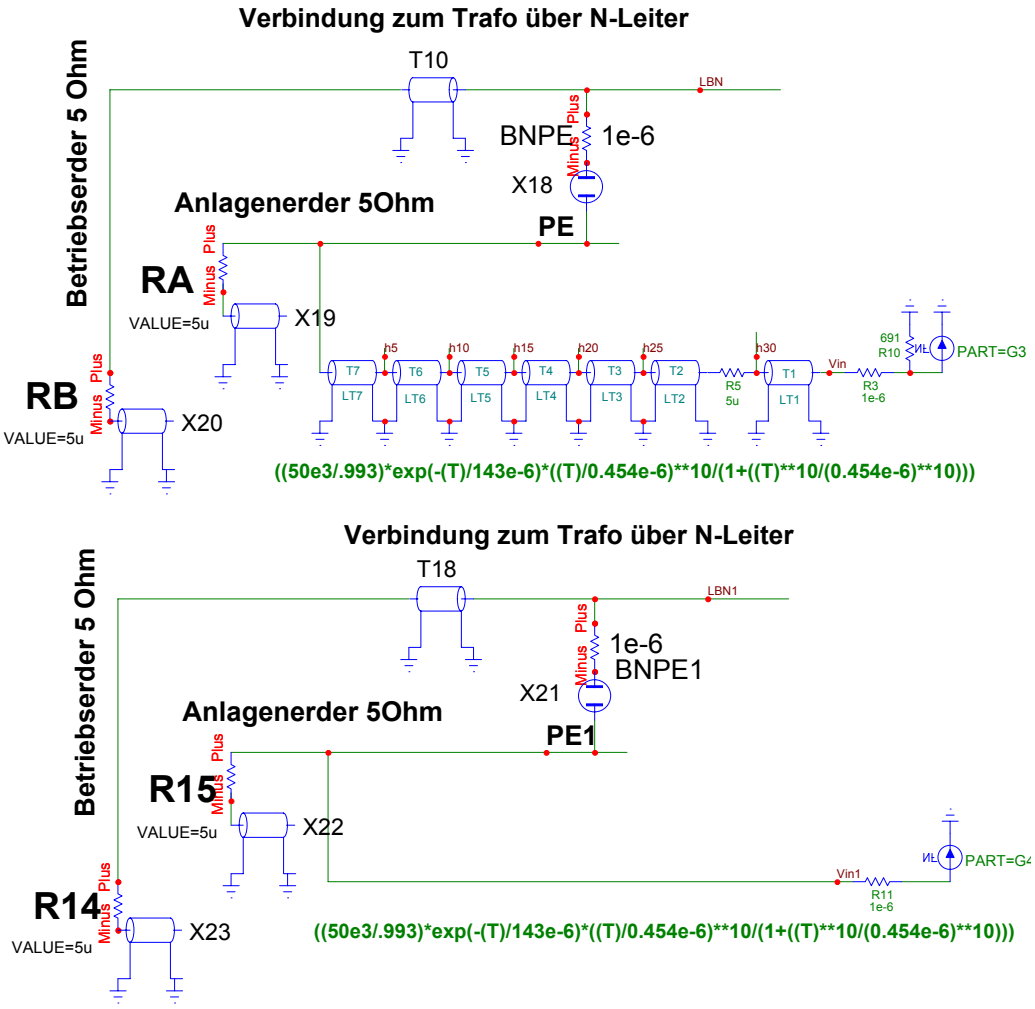


Bild 4.1.1.3.1 Schaltungen im Vergleich. Oben : Mit Wanderwellenmodellierung der Ableitung. Unten Direkte Einspeisung in die Fangstange. Die Verbindungsleitung zum Trafo als N-Leiter wird durch konzentrierte Elemente einer 100m langen Leitung 70mm^2 nachgebildet

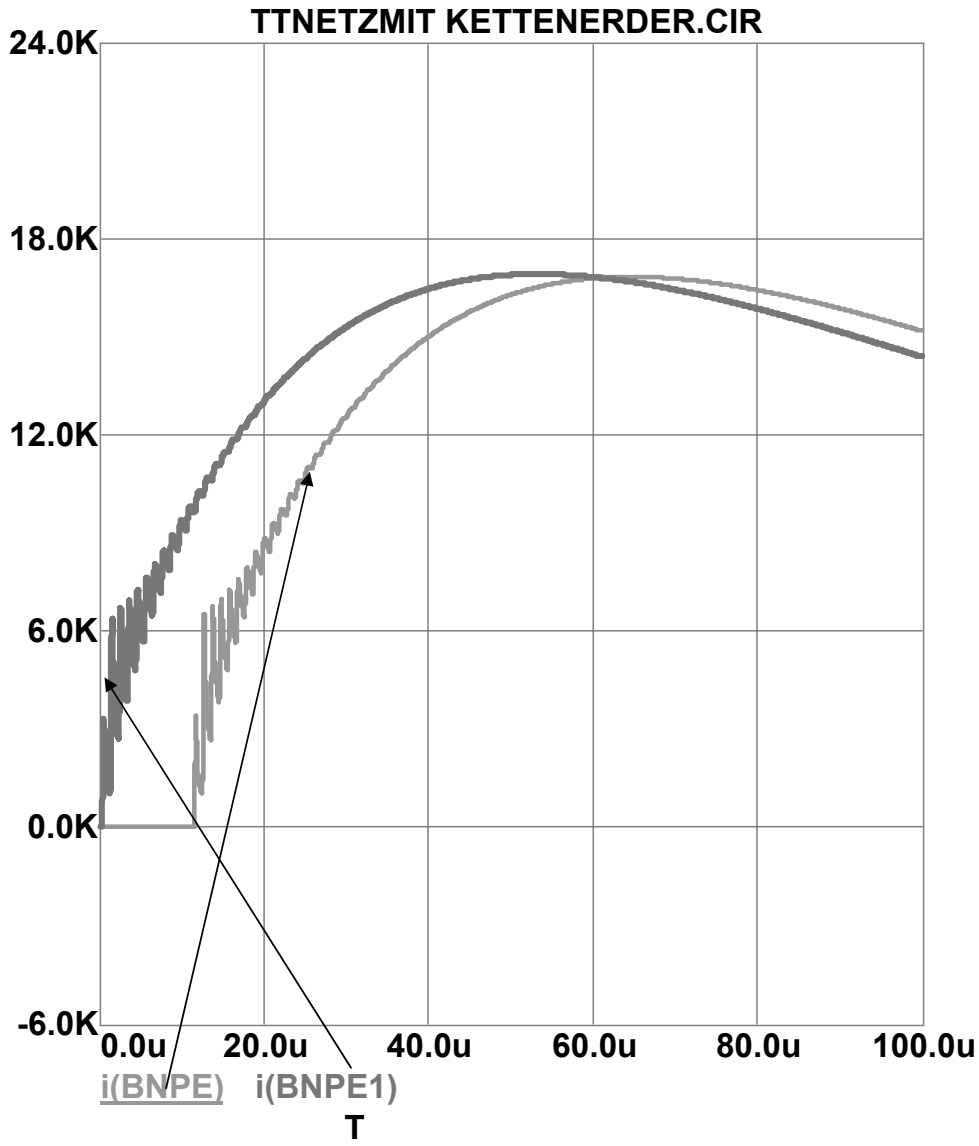


Bild 4.1.1.3.2 Ergebnis der Simulation der Schaltung in Bild 4.1.1.3.1. Die Ströme in beiden Ableitern verhalten sich etwa gleich. Der Zeitversatz entsteht nur durch die Wanderwellenmodellierung der Fangstange.

4.1.1.4 Vergleich der Ableitung mit und ohne Wanderwellenmodelierung bei einem Erdermodell als Kettenleiter und Vergleich zwischen Folgestoßstrom und der Stoßstromform 10/350

Es ist von Interesse, die Belastung von Ableitern im Vergleich der Belastung bei Folgeblitzströmen und den Blitzströmen 10/350 zu vergleichen. Auf der Basis der Schaltung in Bild 4.1.1.3.1 kann diese Frage beantwortet werden, wenn statt der Folgeblitzstromquelle eine genormte Quelle für 10/350 eingesetzt wird.
Bild 4.1.1.4.1 zeigt das Ergebnis.
Bei einer Belastung mit 10/350 treten keine Schwingungen im Strom der N-PE – Funkenstrecke auf.

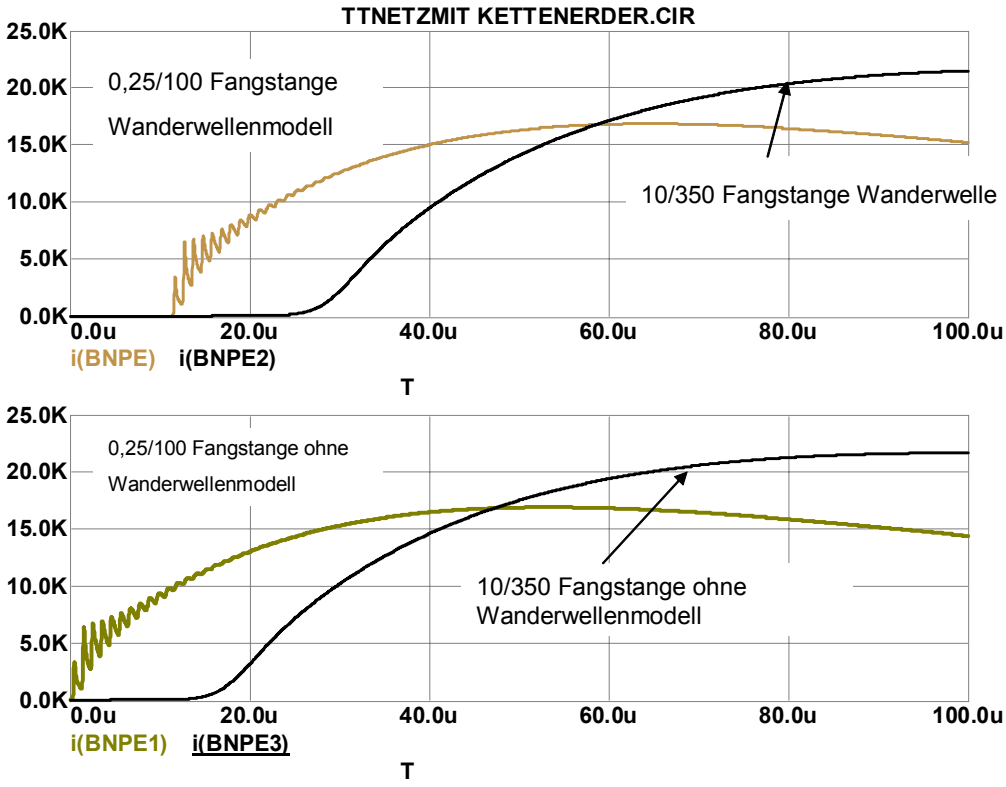


Bild 4.1.1.4.1 Ergebnis der Simulation im Vergleich Folgeblitzstrom und 10/350 hinsichtlich der Beanspruchung von Blitzstromableitern (N-PE-Funkenstrecken)

4.1.2 Verhalten von Blitzstromableitern im TT-Netz mit Modellierung des Erders als Kettenleiter und Modellierung der Fangstange als Wanderwellenmodellierung .

Die bisherigen Modellierungen einzelner Systemkomponenten sind in Bild 4.1.2.1 zu einem einfachen System zusammengeschaltet, so dass die Bedeutung einzelner Komponenten ermittelt und dargestellt werden kann.

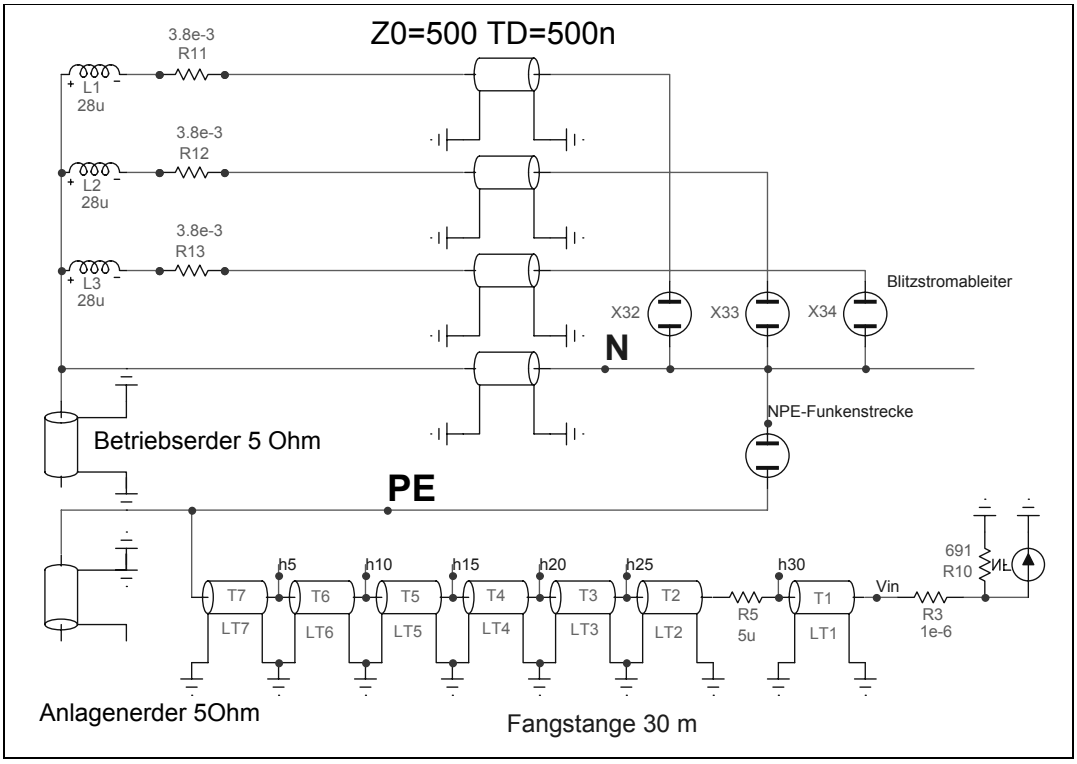


Bild 4.1.2.1 Modellierung eines Gebäudes mit 30 m hoher Ableitung, in die ein Folgestoßstrom 0,25/100µs mit 50 kA Scheitelwert eingespeist wird. Transformator: S=650kVA, Leitung vom Transformator zum Gebäude l=100m.

Bild 4.1.2.2 zeigt den Vergleich der Ströme in den Erdern bei Modellierung mit einem Kettenleitermodell und mit konzentrierten Erdungswiderständen. Es zeigen sich hier deutliche Unterschiede. Die Stromaufteilung wird aber im Wesentlichen durch die Eigenschaften der Leitung zwischen Ableitern und Transformator bestimmt. Deshalb ist der Strom im Anlagenerder bei Annahme eines konzentrierten Widerstandes größer als bei Modellierung durch einen Kettenleiter.
Bild 4.1.2.3 zeigt die Stromaufteilung auf die N-PE-Funkenstrecke, die Blitzstromableiter in den Phasen und im Neutralleiter. Deutlich sind hier Wanderwellenschwingungen im Strom zu erkennen.
Bild 4.1.2.4 zeigt einen Vergleich der Ströme in den Ableitern für Folgestoßstrom 0,25/100µs und den ersten Hauptblitz, 10/350µs. In Tabelle 4.1.2.1 sind die

Belastungsparameter für Ableiter im Vergleich dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Belastung bei Folgestoßstrom lediglich eine höhere Beanspruchung durch di/dt und du/dt zur Folge hat. Das erfordert schnell ansprechende Ableiter, die dafür ausgelegt sind [8].

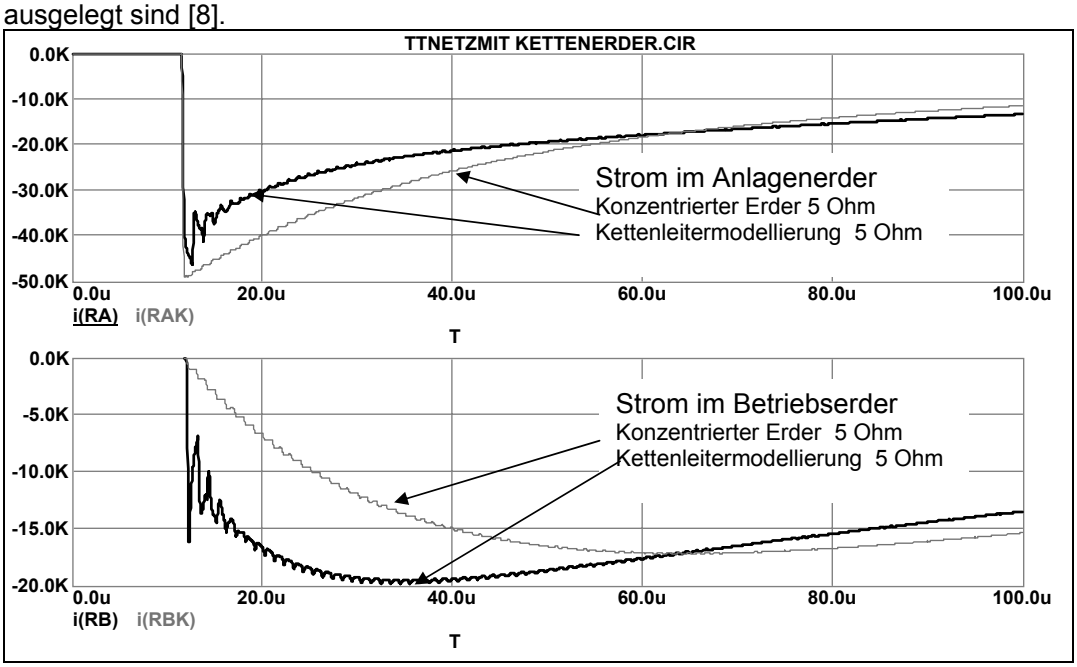


Bild 4.1.2.2 Ströme im Anlagenerder und Betriebserder im Vergleich mit konzentrierten Widerständen von je 5 Ohm als Erder und Erder als Kettenleiter mit je 5 Ohm modelliert.

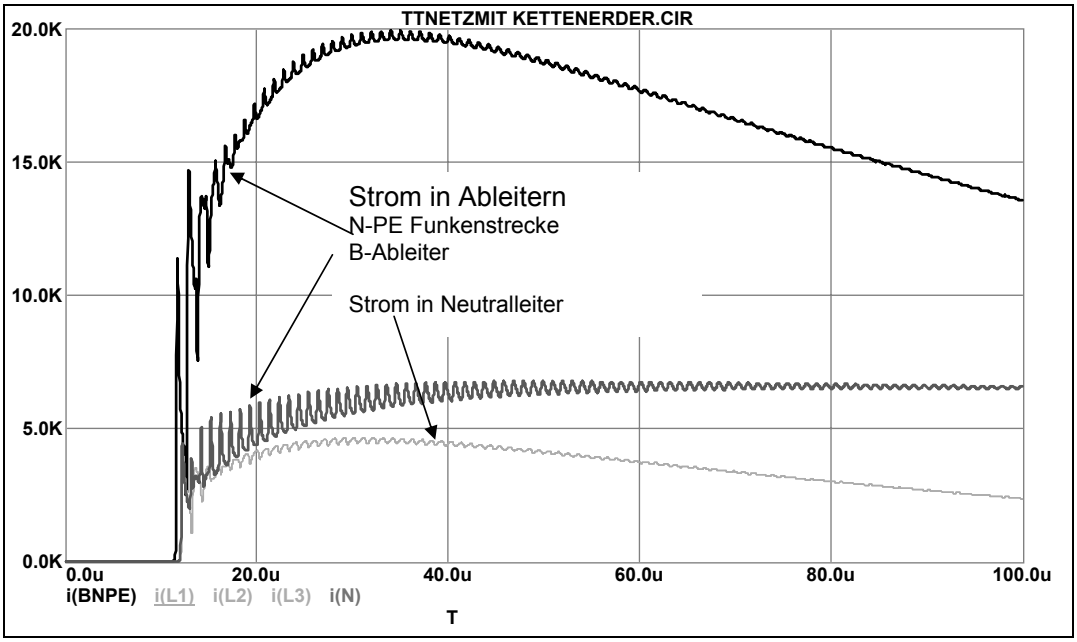
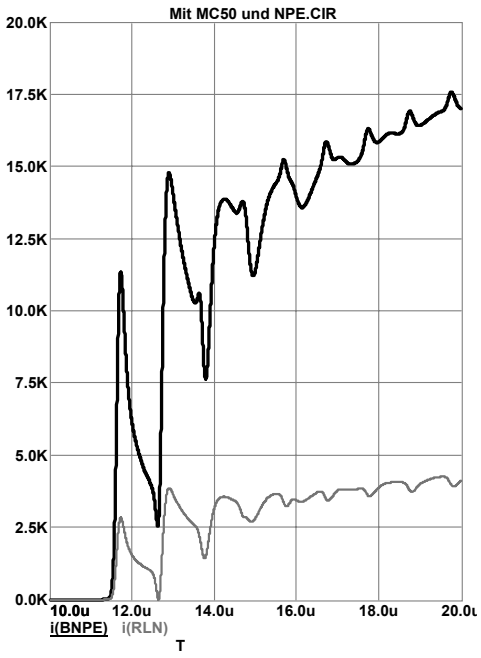
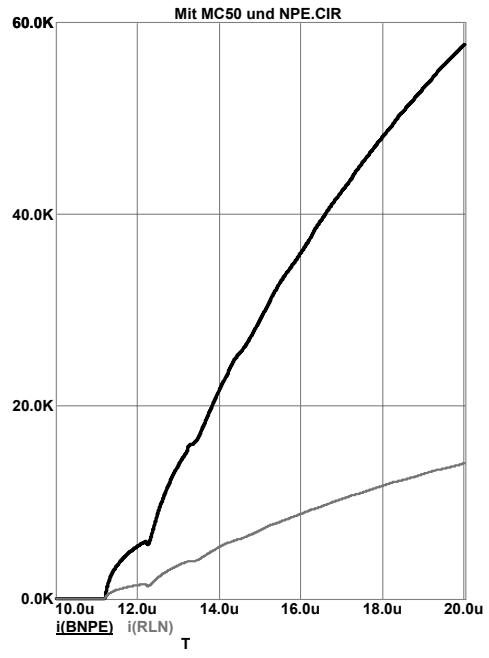


Bild 4.1.2.3 Stromaufteilung der einzelnen Ableiter und Strom im Neutralleiter



Folgestoßstrom 0,25/100µs, 50 kA

Obere Kurve: Strom in N-PE Funkenstrecke
Untere Kurve: Strom im Phasenableiter



Stoßstrom 10/350µs, 200 kA

Obere Kurve: Strom in N-PE Funkenstrecke
Untere Kurve: Strom im Phasenableiter

Bild 4.1.2.4 Vergleichende Rechnungen für Folgestoßstrom 0,25/100µs und Stoßstrom 10/350µs zur Bestimmung der Beanspruchung von Blitzstromableitern.

	di/dt, max.		du/dt, max.		$\hat{i}$		$Q = \int \lvert i \rvert dt$		$\frac{W}{R} = \int i^2 dt$		Erder-ströme i_{max} 1)	
	kA/µs		kV/µs		kA		As		kJ		kA	
Ableiter	N-PE	B	N-PE	B	N-PE	B	N-PE	B	N-PE	B	R_A	R_B
0,25/100 50 kA	96	21	29	$\rightarrow \infty$	19,5	4,5	3,6	0,8	41,9	2,4	46,5	20,3
10/350 200 kA	8	1,8	0,7	$\rightarrow \infty$	94	23	49,6	11,4	2500	145	94	130

1) Scheitelwerte sind zeitlich versetzt.

Tabelle 4.1.2.1 Zusammenfassung der Belastungsparameter von Blitzstromableitern in einem TT-Netz bei Beanspruchung mit Folgestoßstrom 0,25/100µs und Stoßstrom 10/350µs.

5 Literatur

[1] DIN V VDE V 0185-1 (VDE V 0185 Teil 1):2002-11
[2] DIN V VDE V 0185-1 (VDE V 0185 Teil 4):2002-11
[3] Lührmann,H. Rasch veränderliche Vorgänge in räumlich ausgedehnten Hochspannungskreisen, Diss.Braunschweig1973.
[4] Wiesinger,J.: Zur Berechnung des Stoßerdungswiderstandes von Tiefen- und Oberflächenerdern. ETZ A Elektrotechn. Z. A. 99 (1978) H.11, S. 659-661
[5] Borgeest, Kai: Optimierung und Simulation des transienten Ansprech-und Übertragungsverhaltens nichtlinearer Schutzschaltungen für HF-Systeme Siemens Ableitermodellierung. Diss TU Hamburg.
[6] VDE V 0100-534 Elektrische Anlagen von Gebäuden Teil 534: Auswahl und Errichtung von Betriebsmitteln Überspannungsschutzeinrichtungen, April 1999.
[7] IEC 60364-5-53/A2, VDE 0100 Teil 534 Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 5: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel Kapitel 53: Schaltgeräte und Steuergeräte Hauptabschnitt 534: Überspannungs-Schutzeinrichtungen (IEC 64/1168/CDV:2001) Entwurf Juni 2001
[8] Meppelink, Mehl ,Trinkwald Ansprechverhalten von Klasse-B-Blitzstromableitern bei Burstimpulsen ETZ 2/32002

6 Adresse des Autors

Prof. Dr.-Ing. Jan Meppelink, FHSW, Lübecker Ring 2, 59494 Soest.
Tel.: 02921 378 272; Fax.: 02921 378 271; Mobil: 0172 231 2375
e-mail: Meppelink@t-online.de