



Einfluss von Unsicherheiten der Nullimpedanz auf die Erfassung des einpoligen Erdkurzschlusses im Distanzschutz

Thanh Binh Nguyen*, Carlo Liebermann*, Peter Schegner**

Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH) - TU Dresden
 * Professur für Energiesysteme ** Seniorprofessur für Elektroenergieversorgung

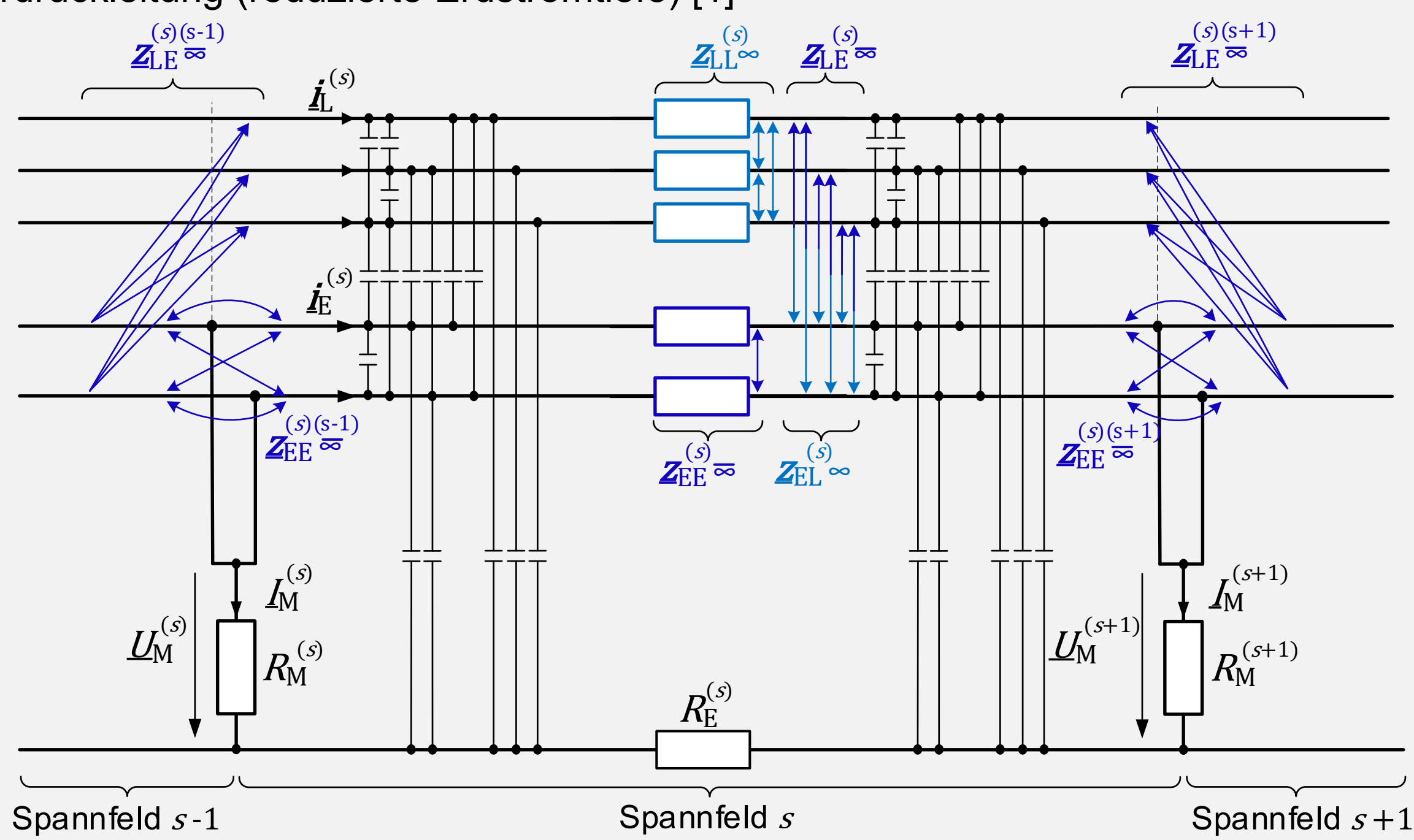


Motivation

- Einpolige Erdkurzschlüsse sind eine der häufigsten Fehlerarten auf Freileitungen
- Die Genauigkeit der Fehlerortung hängt wesentlich von Nullimpedanz Z_0 und Erdschlusskompensationsfaktor k_E -Faktor
- Z_0 ist wiederum von Parametern im Erd- und Erdungsrückstrompfad abhängig
- Konventionelle Modelle vernachlässigen relevante Einflussparameter im Rückstrompfad
 → Verfälschung der Nullimpedanzberechnung → Verfälschung des k_E -Faktors
 → Einfluss auf die ermittelte Distanz bei der Fehlerortung im Distanzschutz
- Berechnung mit erweitertem Modellansatz notwendig: Erweitertes Leitungsmodell
 ⇒ höhere Genauigkeit bei Berechnung von Z_0
 ⇒ Identifikation relevanter Einflussfaktoren auf Z_0
 ⇒ Vergleich der Fehlerortgenauigkeit bei Einstellwerten aus konventionellen bzw. erweiterten Leitungsmodellen
 ⇒ Quantifizierung des Einflusses auf die Fehlerortbestimmung

Freileitungsmodell

- Berücksichtigung endlicher Erdseillängen und Mastausbreitungswiderstände der Erdungspunkte sowie induktiver Verkopplungen zwischen Spannungsfeldern [1][2]
- Berechnung der Impedanzen für Erdseile mit dem Ansatz für Leiter endlicher Länge mit Erdrückleitung (reduzierte Erdstromtiefe) [1]



- Strom-/Spannungsbeziehungen von Leitern und Erdseilkette (inkl. Kopplungen) werden als vollständiges Kirchhoff-Gleichungssystem (VKGS) in Matrixform aufgestellt

UI-Beziehung der LS	Rückkopplung auf Leiterseile durch Ströme in ES	U_s, I_s aller Spannungsfelder	Angabe der Spannung oder Ströme
Kopplung auf Erdseile durch Ströme in LS	UI-Beziehung, Maschen- und Knotengleichung der Erdseilkette	$U_M, \Delta U_{ES}, I_{ES}$ aller Spannungsfelder	0

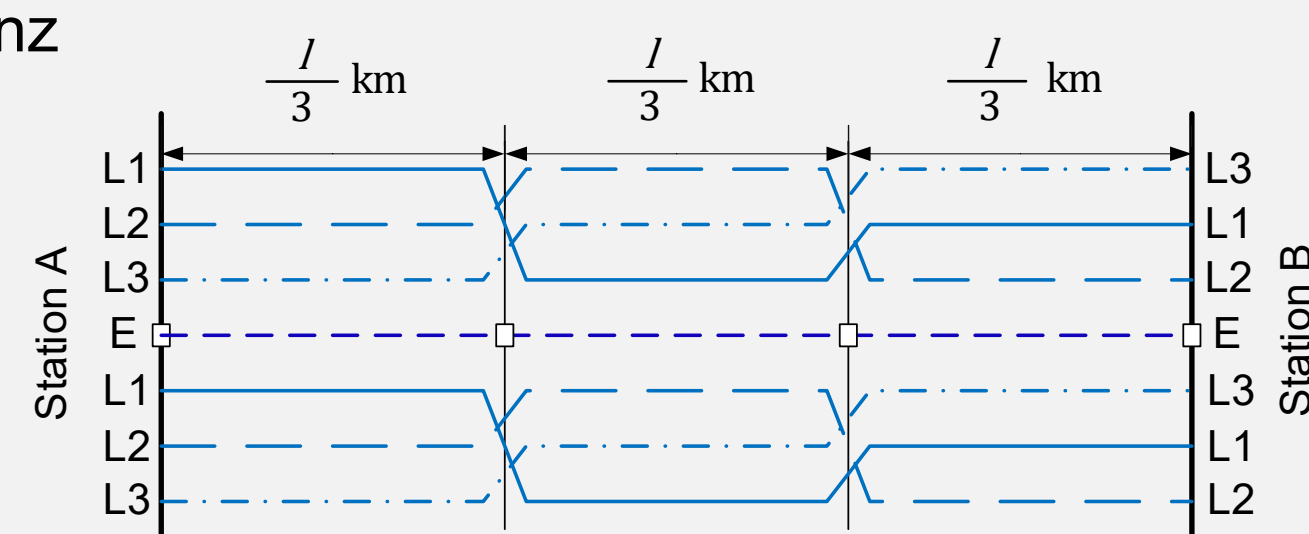
- Messschaltung zur Leitungsparametermessung wird im Modell abgebildet
- Lösung: VKGS → $\underline{u}^{(l)}$ und $\underline{i}^{(l)}$ an jedem Knoten → $\underline{u}^{(1)}$ und $\underline{i}^{(1)}$ am Leitungsanfang
- Bestimmung von Z_0, Z_1 und k_E -Faktor aus $\underline{u}^{(1)}$ und $\underline{i}^{(1)}$
- Validierung der Genauigkeit des Modells im Vergleich zum konventionellen Ansatz, basierend auf Messungen an realen Freileitungen, hat die Genauigkeit des Ansatzes bestätigt [1]

Methode

1. Einfluss wichtiger Faktoren auf die Nullimpedanz

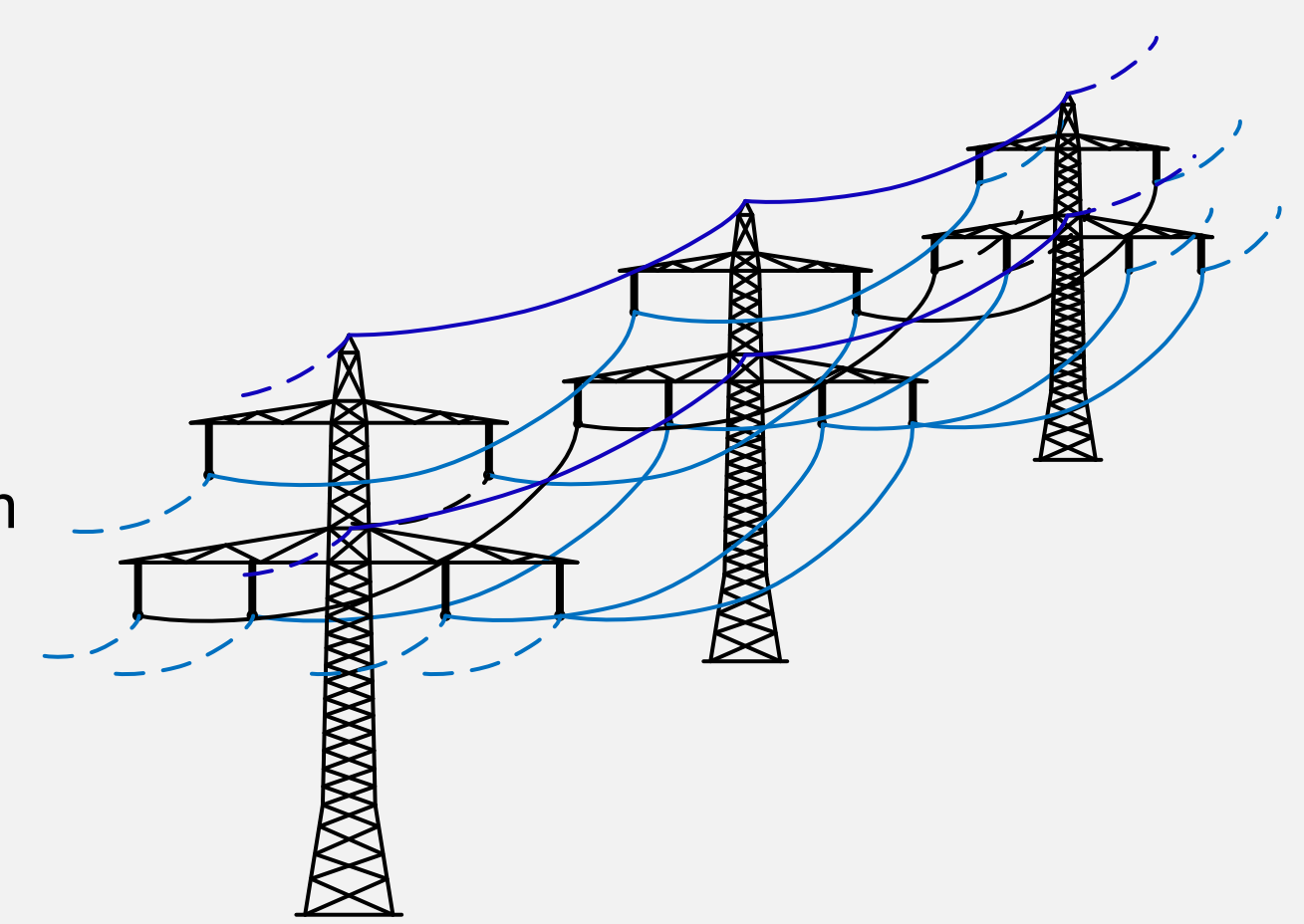
- Modellierung von 380-kV-Doppelleitungen (Donau-Mast) gleicher Spannungsfeldlänge
- Variation der Einflussfaktoren, vor allem

Leitungslänge l	20– 100 km
spez. Erdwiderstand ρ_E	10– 10000 Ωm
Ausbreitungswiderstand R_M	0– 50 Ω



2. Einfluss von Unsicherheiten der Nullimpedanz auf die Fehlerortbestimmung im Distanzschutz

- Modellierung einer verdrehten Leitung mit Leitungsparametern, welche mit konventionellem sowie erweitertem Modell berechnet wurden
- Simulation von Fehlerfällen, Berechnung der Messgrößen des Distanzschutzes am Relaisort
- Fehlerdistanzberechnung und Einflussanalyse



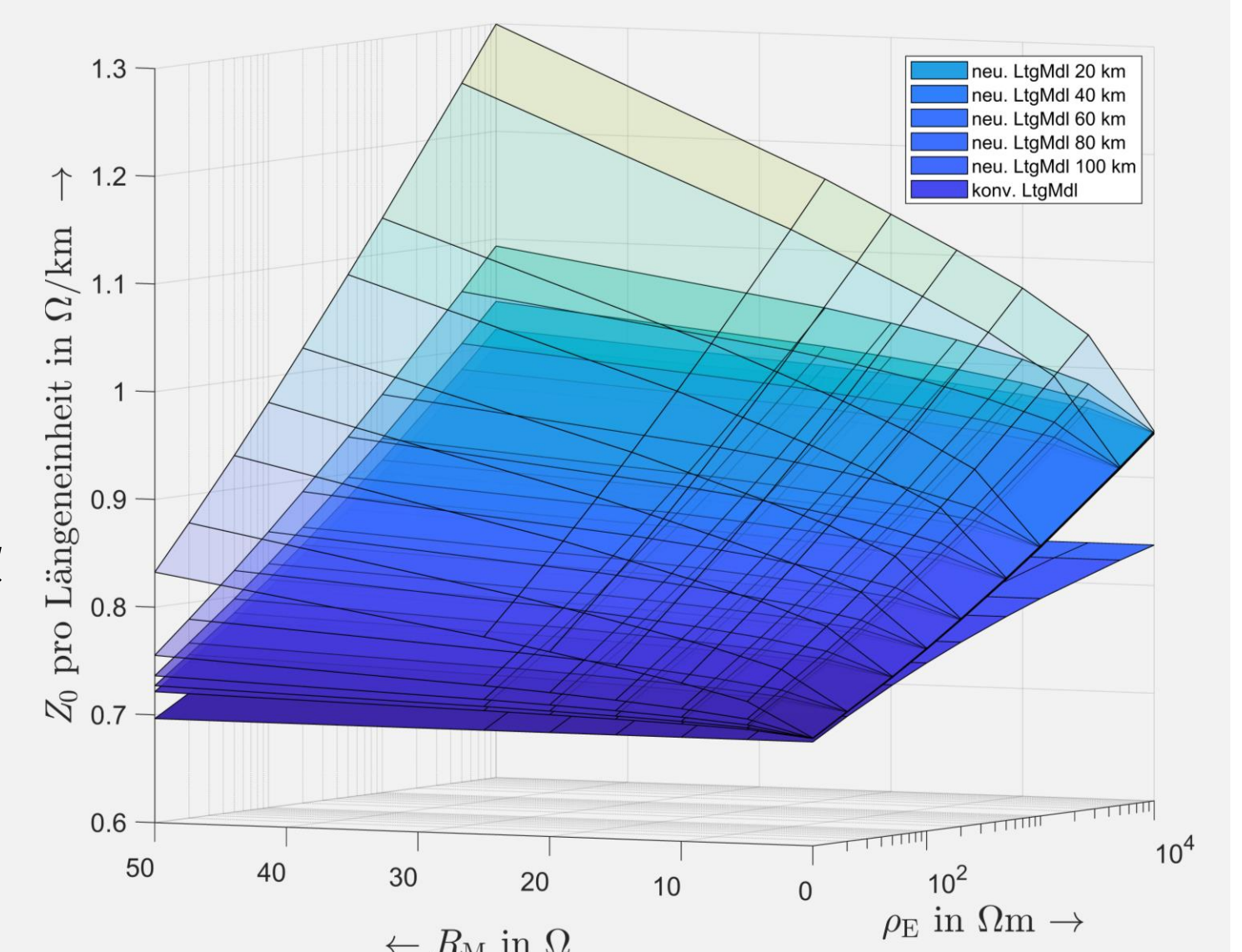
Einflüsse auf Nullimpedanz

1. Einflussparameter für Nullimpedanz pro Längeneinheit (Z_0')

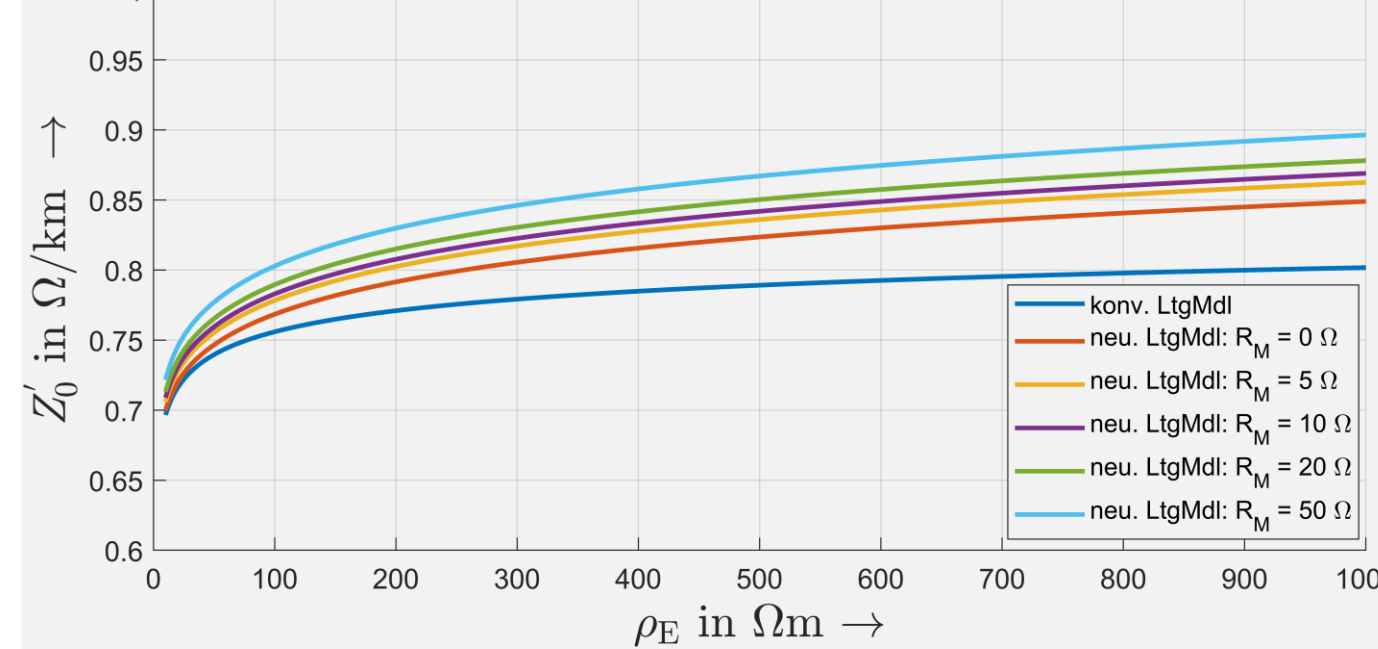
- Z_0' steigt mit zunehmendem ρ_E und R_M
- Typische Bodenabstände und Seildurchhänge: Geringer Einfluss (< 1 %)
- Materialeffekt: Leiter-/Erdseiltyp beeinflusst vor allem R_0', X_0' ändert sich nur gering
- Verdrillung/Phasentausch: praktisch ohne Einfluss auf Z_0'
- Erdseile: Anzahl und Position wirken stark - mehr Erdseil → Z_0' kleiner

2. Vergleich der Modellansätze

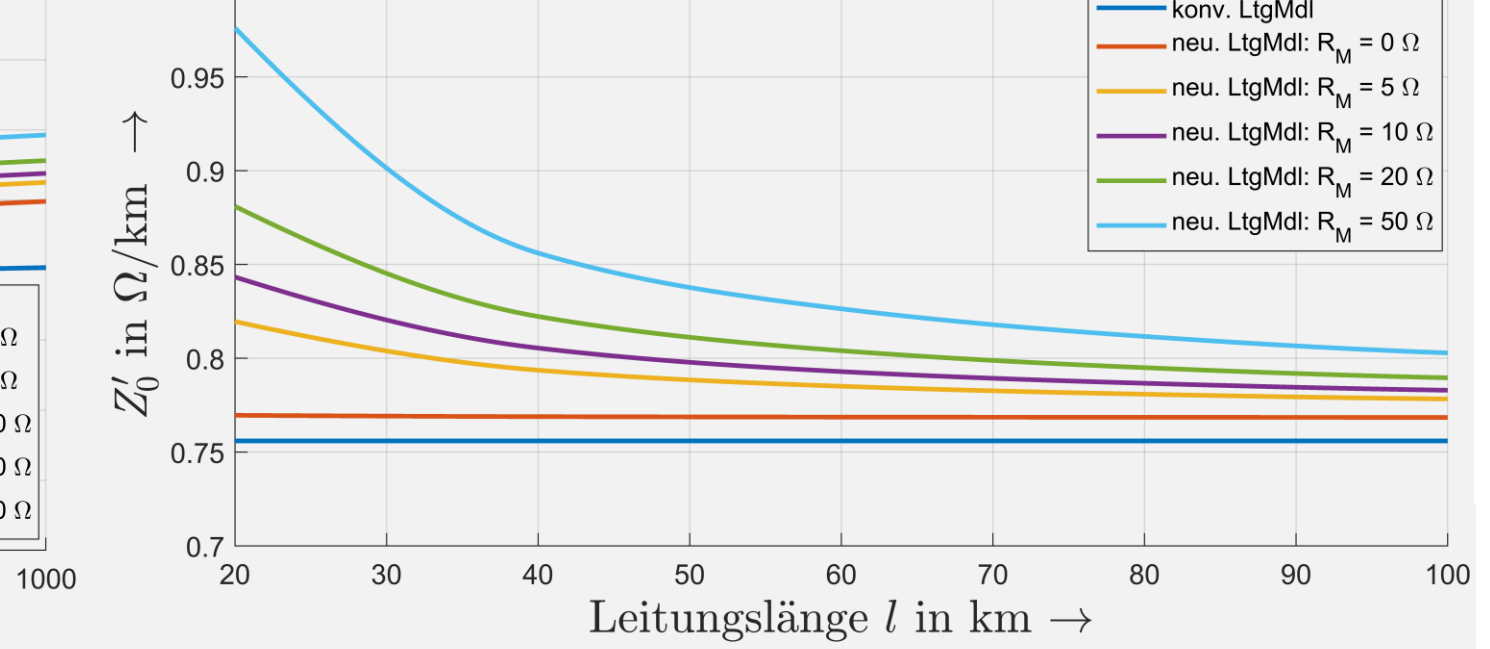
- Konventionelles Modell: Z_0' ist unabhängig von R_M und Leitungslänge l
 ⇒ für jedes ρ_E ergibt sich ein fester Wert
- Erweitertes VKGS-Modell:
 - Bei $R_M = 0$: Z_0' aus dem VKGS-Modell nahezu unabhängig von Leitungslänge l
 - Mit steigendem R_M steigt Z_0' deutlich
 ⇒ Leitungen bis 40 km Leitungslänge: starker Einfluss von R_M auf Z_0'
 ⇒ Je größer ρ_E , desto stärker wirkt sich R_M auf Z_0' aus



Z_0' bei 100 km - Leitung



Z_0' bei $\rho_E = 100 \Omega\text{m}$



Schlussfolgerung:

- Der konventionelle Ansatz berechnet die Nullimpedanz tendenziell zu klein, wenn
 - die Mast-Erdung nicht niederohmig ist und
 - der tatsächliche Boden hochohmiger ist als der häufig angesetzte Richtwert (z.B. 100 Ωm).
- Worst-Case: deutliche Unterschätzung bei kurzer Leitung + hohem ρ_E + hohem R_M

Genauigkeit der Distanzberechnung

Bestimmungsformel für k_E -Faktor und Messimpedanz

$$k_E = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad k_{EM} = \frac{Z_{0M}}{3Z_1} \quad Z_{\text{mess DL}} = \frac{U_{jE}}{I_j - k_E I_E - k_{EM} I_E}$$

- Leitungsabbildung:
 - ⇒ Mit erweitertem Modellierungsansatz bestimmte Leitungsparameter als Referenz für Bestimmung der Genauigkeit der Distanzberechnung
 - ⇒ Symmetrierung der Parameter (Ausblenden des Einflusses der Verdrillung)

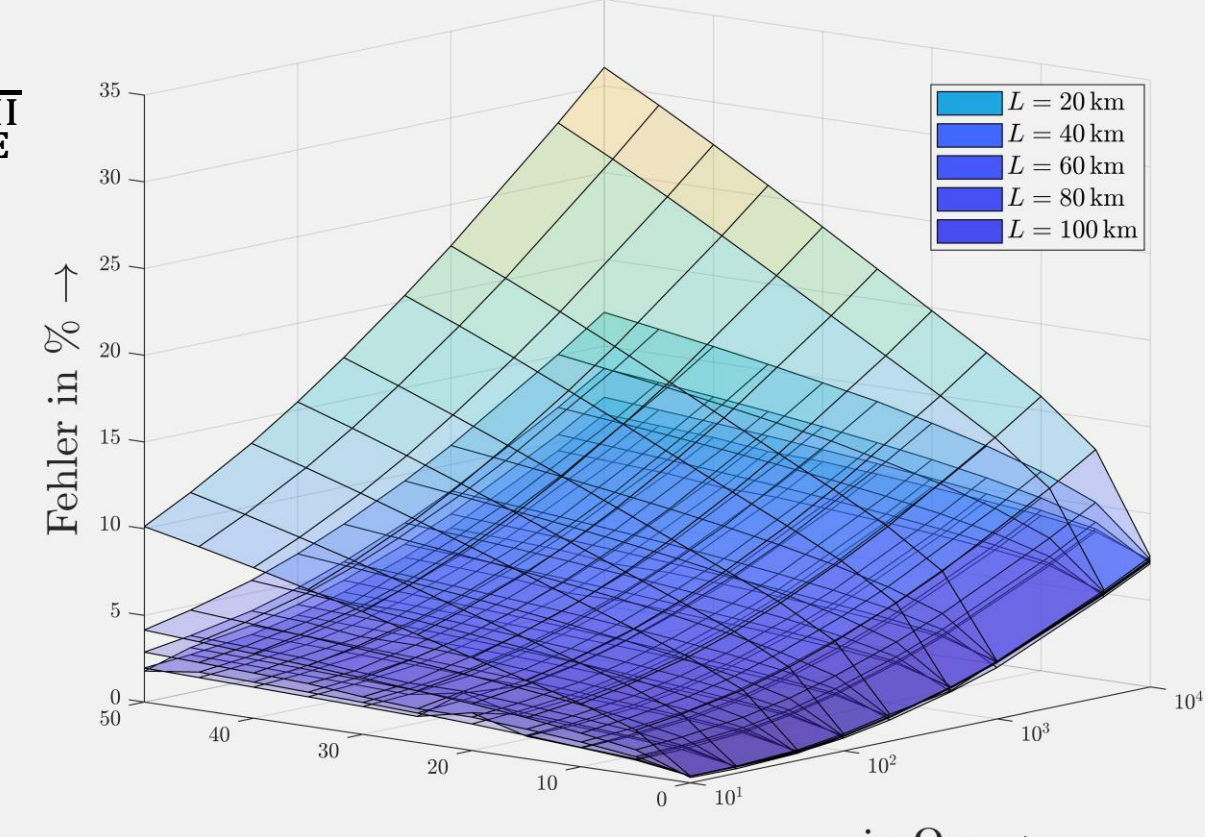
- Distanzberechnung mit berechneten Einstellwerten von erweitertem Leitungsmodell liefert sehr genaue Ergebnisse

- systematische Distanzfehler des Algorithmus mit Parametern aus dem konventionellen Modell
 - tendenziell zu groß bestimmte Distanzen
 - Praxisbereich: $R_M = 0-20 \Omega, \rho_E \approx 100 \Omega\text{m}$:
 ⇒ Fehler 2 – 10%
 - Worst-Case: Fehler bis 30% möglich
 ⇒ Bei kurzen Leitung mit hochohmigem Erdreich und schlechter Erdung
 - Ursache: Unterschätzung von Z_0
 ⇒ k_E -Faktor ↓ ⇒ $Z_{\text{mess}} \uparrow$ ⇒ Distanzschätzung ↑

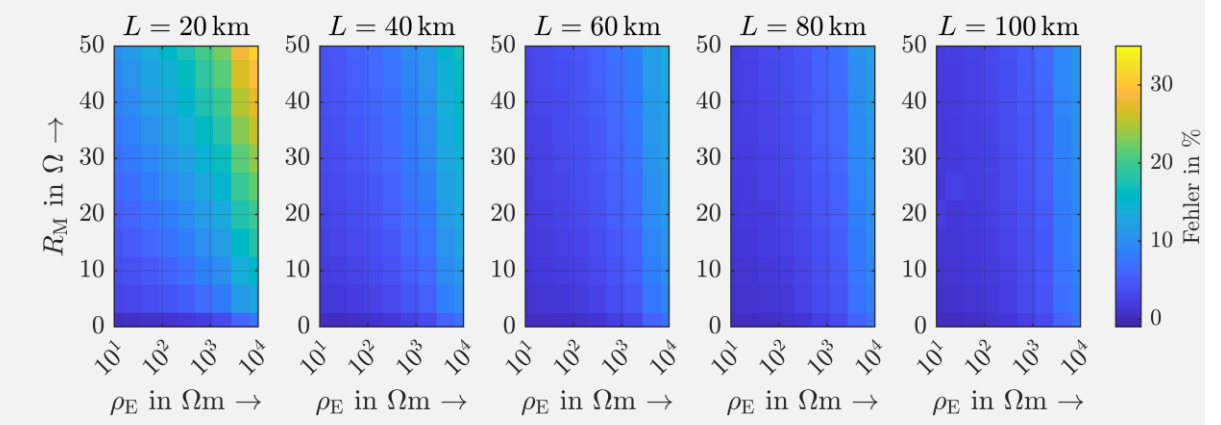
Fazit:

Verfälschung der Nullimpedanzberechnung bei Vernachlässigung relevanter Einflussparameter
 Berechnung der Leitungsparameter mit erweitertem Modellierungsansatz sinnvoll

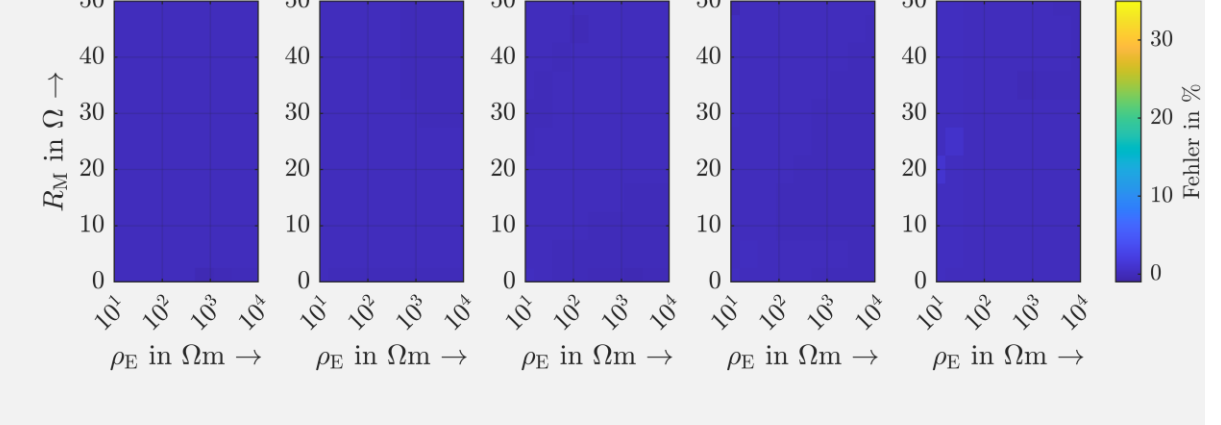
Konventionell: $d_z = 3\{Z\}/3\{Z_1\}$ (error[%])



Konventionell: d_z (Fehler in %)



VKGS: d_z (Fehler in %)



Literatur

[1] Nguyen, T. B.; Liebermann, C.; Schegner, P.: Erarbeitung eines Leitungsmodells zur Berechnung der Leitungsparameter unter Berücksichtigung der endlichen Leitungslänge und Mastausbreitungswiderstände an den Erdungspunkten. In: Elektrotechnik & Informationstechnik 141 (2024), S. 315–324

[2] Nguyen, T. B.; Liebermann, C.; Schegner, P.: Influence of zero-sequence impedance inaccuracy on the detection of phase-to-ground faults by distance protection relays. In: Proceedings of the 19th IET Conference on Developments in Power System Protection (DPSP Europe 2025), Bilbao, Spanien, 2025, S. 105–109. DOI: 10.1049/icp.2025.1053