

Untersuchung der Querverbinder des Erdungs- und Rückleitungssystems



Impressum



Autoren

David Portmann, BLS
Benjamin Jauk, TU Graz

Herausgeber

Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, <https://allianz-fahrweg.ch>

ISBN

978-3-907456-08-8

Lizenz

Solange nichts anderes angegeben ist, sind die Inhalte dieses Dokuments unter der Lizenz [CC-BY 4.0](#) freigegeben. Für die Nutzung von Teilen, die nicht der Allianz Fahrweg Normalspur gehören, kann die Erlaubnis des jeweiligen Rechteinhabers notwendig sein.

Link

<https://www.allianz-fahrweg.ch/publications/9783907456088.pdf>

Zitierung

Portmann, D., Jauk, B., *Untersuchung der Querverbinder des Erdungs- und Rückleitungssystems*, Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, 2026.

Titelbild

Schienen-Querverbinder im Gleis. Eigene Aufnahme.

Version

1.0.0

Interne Referenznummer

PRJ-200-041-301

Inhaltsverzeichnis

1	Management Summary	4
2	Ausgangslage & Ziel	5
3	Herangehensweise	5
4	Ergebnisse	6
4.1	Kettenleiterimpedanz	6
4.2	Erdstromanteil	6
4.3	Stromaufteilung im Rückstromführungssystem	6
4.4	Schienenpotential	6
5	Diskussion & Schlussfolgerungen	7
6	Literaturverzeichnis	8
7	Anhang	9

1 Management Summary

Die Allianz Fahrweg Normalspur hat am Institut für Elektrische Anlagen und Netze (IEAN) der Technischen Universität Graz (TU Graz) eine Studie zur Analyse des Bahnrückstromsystems unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einflussfaktoren in Auftrag gegeben (Projekt-Nr. 2024-31). Untersucht wurde insbesondere die Wirkung der Querverbinder im Erdungs- und Rückleitungssystem auf die Aufteilung des Rückstroms sowie auf das resultierende Schienenpotential. Verglichen wurden die drei gebräuchlichen Rückstromführungssysteme der BLS, der SBB und der ÖBB.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Stromaufteilung im Rückstromsystem massgeblich von der Ausrüstung und der Geometrie der Anlage abhängt. Der spezifische Bodenwiderstand und der Querschnitt der Querverbinder haben demgegenüber keinen wesentlichen Einfluss auf die Aufteilung; sie verursachen lediglich eine Schwankung von rund 5 %, bezogen auf den Betriebsstrom. Über das gesamte zweigleisige System fließen rund 62 % des Betriebsstroms in den Schienen, rund 30 % in den Rückleitern und rund 17 % im Erdreich zurück zum Unterwerk.

Die Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen sind über den überwiegenden Streckenverlauf nur gering belastet (< 5 % des Betriebsstroms). Höhere Belastungen treten lokal auf: rund 15 % unmittelbar neben dem Triebfahrzeug und bis zu rund 80 % bei der Rückstrom-Zusammenführung im Bereich des Unterwerks. Das aus den Simulationen abgeleitete Schienenpotential bleibt mit einer abgeschätzten Berührungsspannung von weniger als 50 V innerhalb des von der Allianz Fahrweg angestrebten Grenzwerts.

Der vorliegende Bericht fasst Ausgangslage, Vorgehensweise und die wesentlichen Erkenntnisse der Studie zusammen und macht diese als publizierte, referenzierbare Grundlage für künftige Planungs-, Prüf- und Genehmigungsprozesse verfügbar. Der vollständige Untersuchungsbericht der TU Graz ist als Anhang beigefügt.

2 Ausgangslage & Ziel

Das Rückstromführungssystem leitet den Traktionsstrom vom Triebfahrzeug über Schienen, Rückleiter und Erdreich zurück zum speisenden Unterwerk. Die konkrete Ausführung dieses Systems – insbesondere Anordnung und Querschnitt der Schienen-Querverbindungen sowie der Mastanbindungen – unterscheidet sich zwischen den Bahnen. Für die Allianz Fahrweg Normalspur stellt sich die Frage, welchen Einfluss diese unterschiedlichen Ausführungen auf die Aufteilung des Rückstroms und auf die elektrische Sicherheit (Schienenpotential bzw. Berührungsspannung) haben.

Vor diesem Hintergrund wurden drei unterschiedliche Rückstromführungssysteme definiert und miteinander verglichen:

- System BLS: Mastanbindung je Gleis alle 50 m und Schienen-Querverbindungen alle 250 m;
- System SBB: keine Mastanbindung, Schienen-Querverbindungen alle 250 m;
- System ÖBB: keine Mastanbindung, Schienen-Querverbindungen alle 750 m.

Untersucht wurde der Einfluss der folgenden Parameter auf den im Rückstromsystem fliessenden Strom:

- spezifischer Bodenwiderstand $\rho = 50, 100, 500$ und $1000 \Omega\text{m}$;
- Abstand der Schienen-Querverbindungen $l = 250$ m bzw. 750 m;
- beim System BLS zusätzlich die einseitige Mastanbindung im Abstand von 50 m.
- Querschnitt der Querverbinder $A = 0, 35, 50, 95$ und 120 mm^2 (0 mm^2 entspricht dem Entfall der Verbindung);

Ziel der Untersuchung war es, die im Rückstromsystem fliessenden Ströme und deren Aufteilung auf Schienen, Rückleiter und Erdreich zu analysieren und darzustellen sowie das Schienenpotential über die gesamte Streckenlänge zu bewerten. Daraus sollen belastbare Grundlagen für die Auslegung und Beurteilung von Rückstromführungs- und Erdungssystemen abgeleitet werden.

3 Herangehensweise

Die Berechnungen wurden mit der Partial-Element-Equivalent-Circuit-Methode (PEEC) durchgeführt. Dieses feldbasierte, aber schaltungskompatible Verfahren erfasst die ohmschen, induktiven und kapazitiven Kopplungen aller Leiter und eignet sich für die Analyse grossräumiger Erdungs- und Rückleitungssysteme. Eingesetzt wurde die Software XGSLab (Modul «XGSA FD»). Sämtliche Werte beziehen sich, soweit nicht anders angegeben, auf die Netzfrequenz von $16,7 \text{ Hz}$ und einen spezifischen Bodenwiderstand von $100 \Omega\text{m}$.

Der Untersuchung liegt ein Drahtmodell einer zweigleisigen Bahnstrecke zugrunde. Modelliert werden Fahrdrabt, Trageil, Rückleiter und Schienen (Typ UIC60) sowie deren Ankopplung an das Erdreich über eine isolierende Umhüllung, die den Übergangswiderstand der Gleisbettung abbildet. Die Anspeisung erfolgt aus einem Unterwerk mit einer Spannung von 15 kV und einem Erdausbreitungswiderstand von 1Ω ; die Rückstrom-Zusammenführung im Bereich des Unterwerks wird gemäss dem Rückleitungs- und Erdungshandbuch RTE 27900 nachgebildet.

Um Rand- und Kettenleitereffekte zuverlässig abzubilden, wird eine Streckenlänge von rund 16 km simuliert; die Ergebnisse werden auf einer Länge von rund 10 km dargestellt, um Verzerrungen durch Randeffecte auszublenden. Das Triebfahrzeug ist in der Grundkonfiguration auf beiden Gleisen bei 8250 m angeordnet; ergänzend werden weitere Positionen betrachtet. Sämtliche Grössen

werden komplex (winkelgetreu) berechnet. Die Bewertung des Schienenpotentials erfolgt anhand der Normen EN 50122-1.

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung zusammengefasst. Die ausführliche Darstellung mit sämtlichen Varianten findet sich im beigefügten Untersuchungsbericht der TU Graz (Anhang). Es ist zu beachten, dass alle Berechnungen mit komplexen Zahlen erfolgen; bei der Darstellung von Absolutwerten ergibt die blossе Summation der Teilströme daher nicht zwingend 100 %.

4.1 Kettenleiterimpedanz

Das Schienensystem samt Rückleitungsführung bildet eine grossräumige, verteilte Erdungsanlage mit einem endlichen Ausbreitungswiderstand, der sich der Kettenleiterimpedanz annähert. Für die zweigleisige Strecke liegen die ermittelten Werte zwischen rund 0,2 Ω und 1,5 Ω , für die eingleisige Strecke zwischen rund 0,3 Ω und 1,9 Ω . Der Endwert wird je nach spezifischem Bodenwiderstand in einem Bereich zwischen rund 5 km und 40 km erreicht. Die Startimpedanz des Unterwerks spielt dabei eine untergeordnete Rolle.

4.2 Erdstromanteil

Der Anteil des Rückstroms, der über das Erdreich fliesst, hängt wesentlich von der Länge des Strompfades bzw. der Entfernung des Triebfahrzeugs zum Unterwerk ab. Für nahe Positionen ist der Erdstromanteil gering, für weit entfernte Positionen steigt er bis auf rund 30 % (im Einzelfall bis 33 %). Bei geringeren Abständen der Querverbindungen (System BLS) tritt die Sättigung früher ein (bei rund 6000 m) als bei grossen Abständen (System ÖBB, bei rund 10000 m); das System SBB liegt dazwischen.

4.3 Stromaufteilung im Rückstromführungssystem

Der Rückstrom wird unmittelbar in den Rückleiter abgeleitet. Werden die Fälle mit angebundenem Rückleiter betrachtet, ergibt sich für das gesamte zweigleisige System eine Aufteilung von rund 62 % in den Schienen, rund 30 % in den Rückleitern und rund 17 % im Erdreich. Wird zusätzlich die Variante «Entfall der Schienen-Querverbindungen» berücksichtigt, verschiebt sich die Aufteilung auf rund 66 % in den Schienen, rund 25 % in den Rückleitern und rund 20 % im Erdreich.

Die Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen sind über den überwiegenden Streckenverlauf gering belastet (< 5 % des Betriebsstroms). Höher belastet sind lediglich die Verbindungen unmittelbar neben dem Triebfahrzeug (rund 15 %) sowie die Verbindung im Bereich der Rückstrom-Zusammenführung zum Unterwerk, die bis zu rund 80 % des Betriebsstroms führt. Der spezifische Bodenwiderstand und der Querschnitt der Querverbinder beeinflussen die Aufteilung nicht wesentlich; sie bewirken lediglich eine Schwankung von rund 5 %.

4.4 Schienenpotential

Das Schienenpotential wird gegen ferne Erde dargestellt und gemäss EN 50122-1 als Richtwert für die Berührungsspannung herangezogen. In den durchgeführten Simulationen liegt das

Schienenpotential im Bereich von 0 V bis rund 140 V. Die daraus abgeleitete Berührungsspannung ergibt in einer Worst-Case-Abschätzung 0 V/kA bis rund 23 V/kA und bleibt damit unterhalb des von der Allianz Fahrweg angestrebten simulativen Grenzwerts von 50 V. Der Zusammenhang zwischen Betriebsstrom und Schienenpotential ist nicht direkt proportional; die Hochrechnung stellt daher eine konservative Abschätzung für den Kurzschlussfall dar, da das Schienenpotential von der Position der Lasten abhängig ist.

5 Diskussion & Schlussfolgerungen

Die Untersuchung zeigt, dass sich die drei betrachteten Rückstromführungssysteme (BLS, SBB, ÖBB) hinsichtlich der grundsätzlichen Stromaufteilung ähnlich verhalten. Massgeblich für die Aufteilung sind die Ausrüstung und die Geometrie der Anlage, insbesondere das Vorhandensein und die Anbindung des Rückleiters. Der spezifische Bodenwiderstand und der Querschnitt der Querverbinder wirken sich demgegenüber nur geringfügig aus.

Für die Praxis bedeutsam ist die hohe Belastung der Querverbindung im Bereich der Rückstrom-Zusammenführung zum Unterwerk (bis rund 80 % des Betriebsstroms). Dieser Bereich ist bei der Auslegung und Dimensionierung der Querverbinder besonders zu beachten. Über den übrigen Streckenverlauf sind die Querverbinder dagegen nur gering belastet, was Spielräume bei deren Ausführung eröffnet.

Hinsichtlich der elektrischen Sicherheit bestätigt die Untersuchung, dass die abgeleitete Berührungsspannung im Betriebsfall deutlich unterhalb der normativen Grenzwerte (EN 50122-1: 60 V für die Langzeitwirkung) sowie unterhalb des von der Allianz Fahrweg angestrebten Grenzwerts von 50 V bleibt. Aufgrund der guten Kopplung des Rückstromsystems ist der für die Berührungsspannung relevante, ins Erdreich abfließende Stromanteil gering.

Mit der Publikation dieses Berichts samt der zugrunde liegenden Studie steht eine nachvollziehbare und referenzierbare Grundlage zur Verfügung, die in künftige Planungs-, Prüf- und Genehmigungsprozesse einfließen kann. Die detaillierten Ergebnisse und sämtliche Varianten sind dem beigefügten Untersuchungsbericht der TU Graz zu entnehmen.

6 Literaturverzeichnis

[1] Jauk, B., Schürhuber R., Analyse des Bahnrückstromsystems unter der Berücksichtigung unterschiedlicher Einflussfaktoren, Projekt Nr. 2024-31, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Technische Universität Graz, Graz, 2026 (siehe Anhang).

[2] EN 50122-1, Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung, Teil 1: Schutzmassnahmen gegen elektrischen Schlag, 2023.

[3] RTE 27900, Rückleitungs- und Erdungshandbuch, 2008.

7 Anhang

Als Anhang ist der vollständige Untersuchungsbericht des Instituts für Elektrische Anlagen und Netze (IEAN) der Technischen Universität Graz beigefügt:

Jauk, B., Schürhuber R.: *Analyse des Bahnrückstromsystems unter der Berücksichtigung unterschiedlicher Einflussfaktoren*. Im Auftrag der Allianz Fahrweg, Projekt Nr. 2024-31, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, TU Graz, Juni 2026.



© fotopro - Fotolia.com

Analyse des Bahnrückstromsystems unter der Berücksichtigung unterschiedlicher Einflussfaktoren

Im Auftrag der
Allianz Fahrweg

Projekt Nr.: 2024-31



ELEKTRISCHE
ANLAGEN & NETZE
TU GRAZ

TU Graz

Institut für Elektrische Anlagen und Netze

Inffeldgasse 18/I

8010 Graz

Austria

Institutsvorstand

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr. techn. Robert Schürhuber

Projektleitung

Dipl.-Ing. Benjamin Jauk

Wissenschaftliche Ausarbeitung

Dipl.-Ing. Benjamin Jauk, Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn Robert Schürhuber

Juni 2026

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Projektbeschreibung	1
1.2. Aufgabenstellung	1
1.3. Modell	1
2. Theorie	4
2.1. Kettenleiterberechnung	4
2.2. Stromaufteilung	4
2.3. Schienenpotential	5
2.4. Berechnungsprogramm	6
2.5. Weitere Effekte aufgrund von elektrischen Anlagen	7
2.5.1. Magnetische Felder	7
2.5.2. Elektrische Felder	7
3. Ergebnisse	8
3.1. Einleitung	8
3.2. Kettenleiterimpedanzen	8
3.3. Erdstromanteil	12
3.4. Rückstromführungssystem	14
3.5. Schienenpotentiale	19
4. Zusammenfassung	22
Technische Unterlagen	25
Literatur	26
A. Anhang	i
A.1. Kettenleiterimpedanzen	ii
A.2. Rückstromführung	vi
A.3. Schienenpotential	xxvii
A.4. Vergleich unterschiedliche Positionen, System BLS	xxx

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Simulationsmodell - Ansicht Querprofil zweigleisig	2
1.2.	Simulationsmodell - Rückstrom-Zusammenführung im Bereich der Anspeisung aus dem Unterwerk (UW)	3
2.1.	Kettenleitermodell einer zweigleisigen Bahnstrecke	4
3.1.	Zeigerdiagramm: Stromaufteilung bei 3 400 m - System: BLS	8
3.2.	Kettenleiterimpedanzen für die ein- bzw. zweigleisige Strecke bei $\varrho = 100 \Omega \text{ m}$ mit einer Anfangsimpedanz $Z_A = 0,5 \Omega$	9
3.3.	Vergleich der Kettenleiterimpedanzen für unterschiedliche Startimpedanzen des Unterwerks	10
3.4.	Stromaufteilung für eine zweigleisige Strecke bei $\varrho = 100 \Omega \text{ m}$ für unterschiedliche Positionen des Triebfahrzeuges, System BLS	13
3.5.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom: Übersicht aller Varianten . .	15
3.6.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom: Übersicht aller Varianten - im Bereich des UWs	15
3.7.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem - Übersicht aller Varianten	16
3.8.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom: Übersicht aller Varianten (ohne Entfall der Schienen-Querverbindungen)	17
3.9.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom: Übersicht aller Varianten - im Bereich des UWs (ohne Entfall der Schienen-Querverbindungen)	18
3.10.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem - Übersicht aller Varianten (ohne Entfall der Schienen-Querverbindungen) .	18
3.11.	Schienenpotential: Übersicht aller Varianten	19
3.12.	Schienenpotential: Übersicht aller Varianten - relative Darstellung bezogen auf den Betriebsstrom. Die Berührungsspannung (rot strichliert) ist vom Mittelwert des Schienenpotentials abgeleitet. Auf die Darstellung des Schwankungsbereichs wird verzichtet.	20
3.13.	Schienenpotential: Übersicht aller Varianten (ohne Entfall der Schienen-Querverbindungen)	21
3.14.	Schienenpotential: Übersicht aller Varianten (ohne Entfall der Schienen-Querverbindungen) - relative Darstellung bezogen auf den Betriebsstrom. Die Berührungsspannung (rot strichliert) ist vom Mittelwert des Schienenpotentials abgeleitet. Auf die Darstellung des Schwankungsbereichs wird verzichtet.	21
A.1.1.	Vergleich der Kettenleiterimpedanzen bei $\varrho = 50 \Omega \text{ m}$ für unterschiedliche Anfangsimpedanzen des Unterwerks	ii
A.1.2.	Vergleich der Kettenleiterimpedanzen bei $\varrho = 100 \Omega \text{ m}$ für unterschiedliche Anfangsimpedanzen des Unterwerks	iii
A.1.3.	Vergleich der Kettenleiterimpedanzen bei $\varrho = 500 \Omega \text{ m}$ für unterschiedliche Anfangsimpedanzen des Unterwerks	iv
A.1.4.	Vergleich der Kettenleiterimpedanzen bei $\varrho = 1000 \Omega \text{ m}$ für unterschiedliche Anfangsimpedanzen des Unterwerks	v
A.2.5.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen - System: BLS	vi
A.2.6.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen, im Bereich des UWs - System: BLS	vi

A.2.7.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS	vii
A.2.8.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS	vii
A.2.9.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS	viii
A.2.10.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS	viii
A.2.11.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen - System: SBB	ix
A.2.12.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, im Bereich des UWs - System: SBB	ix
A.2.13.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB	x
A.2.14.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB	x
A.2.15.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB	xi
A.2.16.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB	xi
A.2.17.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen - System: OEGB	xii
A.2.18.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, im Bereich des UWs - System: OEGB	xii
A.2.19.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEGB	xiii
A.2.20.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEGB	xiii
A.2.21.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEGB	xiv
A.2.22.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEGB	xiv
A.2.23.	Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem - System: BLS	xv

A.2.24. Zeigerdiagramm: Stromaufteilung bei 3400m - System: BLS	xv
A.2.25. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem ohne Schienen-Querverbindungen - System: BLS	xvi
A.2.26. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängig- keit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS	xvi
A.2.27. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängig- keit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS	xvii
A.2.28. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängig- keit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS	xvii
A.2.29. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängig- keit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS	xviii
A.2.30. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem - System: SBB	xix
A.2.31. Zeigerdiagramm: Stromaufteilung bei 3400m - System: SBB	xix
A.2.32. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem ohne Schienen-Querverbindungen - System: SBB	xx
A.2.33. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängig- keit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB	xx
A.2.34. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängig- keit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB	xxi
A.2.35. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängig- keit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB	xxi
A.2.36. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängig- keit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB	xxii
A.2.37. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem - System: OEGB	xxiii
A.2.38. Zeigerdiagramm: Stromaufteilung bei 3400m - System: OEGB	xxiii
A.2.39. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem ohne Schienen-Querverbindungen - System: OEGB	xxiv
A.2.40. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängig- keit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEGB	xxiv
A.2.41. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängig- keit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEGB	xxv
A.2.42. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängig- keit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEGB	xxv
A.2.43. Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängig- keit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEGB	xxvi
A.3.44. Schienenpotential ohne Schienen-Querverbindungen und ohne Mastanbindung - System: BLS	xxvii
A.3.45. Schienenpotential - System: BLS	xxvii
A.3.46. Schienenpotential ohne Schienen-Querverbindungen - System: SBB	xxviii
A.3.47. Schienenpotential - System: SBB	xxviii
A.3.48. Schienenpotential ohne Schienen-Querverbindungen - System: OEGB	xxix
A.3.49. Schienenpotential - System: OEGB	xxix
A.4.50. Stromaufteilung im Verhältnis zum Betriebsstrom entlang der Strecke, Position des Triebfahrzeuges bei 2 050 m	xxx

A.4.51. Schienenpotentiale, Position des Triebfahrzeuges bei 2050 m	xxx
A.4.52. Stromaufteilung im Verhältnis zum Betriebsstrom entlang der Strecke, Position des Triebfahrzeuges bei −2050 m	xxxi
A.4.53. Schienenpotentiale, Position des Triebfahrzeuges bei −2050 m	xxxi
A.4.54. Stromaufteilung im Verhältnis zum Betriebsstrom entlang der Strecke, Positionen der Triebfahrzeuge bei ±2050 m, 8550 m	xxxii
A.4.55. Schienenpotentiale, Positionen der Triebfahrzeuge bei ±2050 m, 8550 m . . .	xxxii
A.4.56. Stromaufteilung im Verhältnis zum Betriebsstrom entlang der Strecke, Position des Triebfahrzeuges bei 12450 m	xxxiii
A.4.57. Schienenpotentiale, Position des Triebfahrzeuges bei 12450 m	xxxiii
A.4.58. Stromaufteilung im Verhältnis zum Betriebsstrom entlang der Strecke, Position des Triebfahrzeuges bei 12450 m, mit Kettenleiterimpedanz	xxxiv
A.4.59. Schienenpotentiale, Position des Triebfahrzeuges bei 12450 m, mit Kettenleiterimpedanz	xxxiv

Tabellenverzeichnis

1.1. Kennwerte der verwendeten Leiter	2
3.1. Kettenleiterimpedanzen für die eingleisige Strecke bei variierendem spez. Bodenwiderstand	11
3.2. Kettenleiterimpedanzen für die zweigleisige Strecke bei variierendem spez. Bodenwiderstand	11

1. Einleitung

1.1. Projektbeschreibung

Im Rahmen des Projektes „Allianz Rückstromführung“ sollen unterschiedliche Rückstromführungssysteme für Bahnstromversorgungen analysiert werden. Dabei werden die Rückstromführungssysteme der BLS, SBB und ÖBB miteinander verglichen. Es wird der Einfluss von unterschiedlichen Querschnitten, Abständen der Schienen-Querverbindungen, sowie des spezifischen Bodenwiderstands auf den in den fließenden Rückstrom analysiert. Das grundlegende Querprofil, sowie die Querschnitte von Fahrdrabt (FD), Tragseil (TS) und Rückleiter-Seil (RL) bleibt konstant.

1.2. Aufgabenstellung

Es werden die im Rückstromsystem fließenden Ströme analysiert und dargestellt. Die Einflüsse von:

- (i) Spezifischer Bodenwiderstand: $\varrho = \{50, 100, 500, 1000\} \Omega \text{ m}$,
- (ii) Abstand der Schienen-Querverbindungen: $\ell = \{250, 750\} \text{ m}$, sowie
- (iii) Querschnitt¹⁾: $A = \{0, 35, 50, 95, 120\} \text{ mm}^2$;
- (iv) zusätzlich beim System BLS: einseitige Mastanbindung $\ell = 50 \text{ m}$

werden berücksichtigt.

Es werden drei unterschiedliche Rückstromführungssysteme simuliert und verglichen:

- (i) System BLS: Mastanbindung je Gleis alle 50 m und Schienen-Querverbindungen alle 250 m.
- (ii) System SBB: Entfall der Mastanbindung, nur Schienen-Querverbindungen alle 250 m.
- (iii) System ÖBB: Entfall der Mastanbindung, nur Schienen-Querverbindungen alle 750 m.²⁾

Zusätzlich wird das Schienenpotential über die gesamte Länge des Systems dargestellt.

1.3. Modell

Das in der Simulation verwendete Drahtmodell ist in der Abb. 1.1 bzw. Abb. 1.2 dargestellt.

Folgende Parameter werden dem Modell zugrunde gelegt. Diese sind für alle Varianten konstant und werden nicht verändert.

¹⁾Der Querschnitt 0 mm^2 stellt den Entfall der Verbindung dar.

²⁾Im System ÖBB werden Schienen-Querverbindungen als Gelbringmaste bezeichnet.

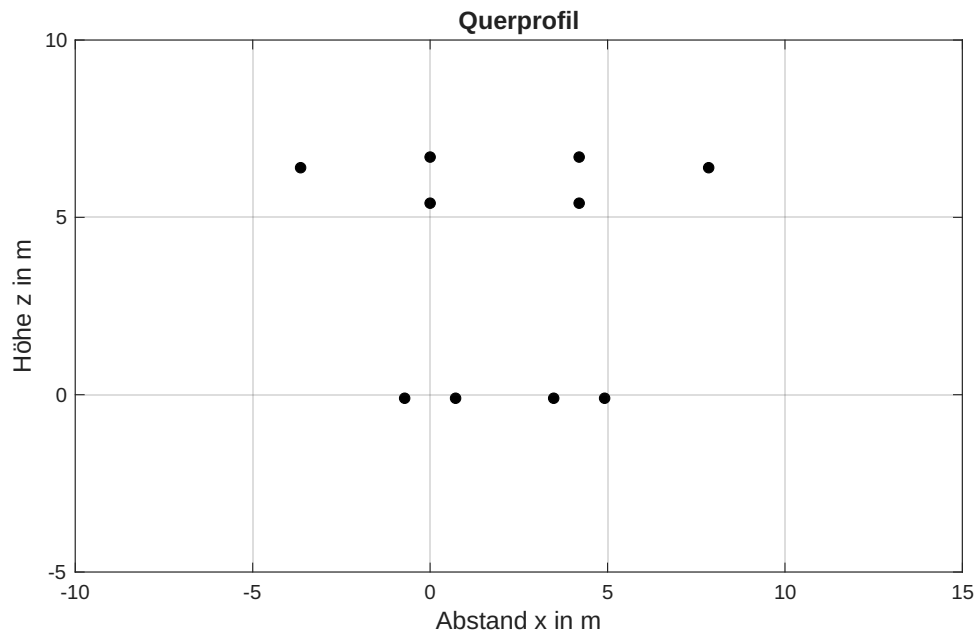


Abbildung 1.1: Simulationsmodell - Ansicht Querprofil zweigleisig

Tabelle 1.1: Kennwerte der verwendeten Leiter

Name	Material	Art	Durchmesser mm	Querschnitt mm ²	spez. Widerstand Ω m
Fahrdraht	Kupfer	Vollleiter	12	113,1	$1,8 \cdot 10^{-8}$
Tragseil			10	78,5	
Rückleiter		Seil	12,5	95	
Schiene UIC60	Stahl	Rohr	215,5	7671	$1,15 \cdot 10^{-7}$

Die Schiene ist mit einer Umhüllung ausgeführt, um den Einfluss der Ballastierung als Übergang zum Erdreich zu berücksichtigen, die Umhüllung ist mit einer Dicke von 1 mm und einem spezifischen Widerstand von $4\,650\,\text{k}\Omega\,\text{m}$ modelliert.

Beim UW erfolgt die Rückstrom-Zusammenführung gemäß [T1] über die Länge von drei Masten, wobei diese als Schienen-Querverbindungen (d.h. beide Gleise und der Rückleiter sind durchverbunden) erfolgt. Im Bereich dieser drei Masten ist auch, wie in [T1] angeführt, ein zweiter Rückleiter angeordnet (siehe Abb. 1.2). Die Anspeisung aus dem UW erfolgt mittels zweier gebündelter Kupferseile (Querschnitt $400\,\text{mm}^2$), wobei UW-seitig als Speisung eine Spannungsquelle mit $U = 15\,\text{kV}$ wirkt. Der Erdausbreitungswiderstand des UWs ist mit $R_{A,UW} = 1\,\Omega$ angenommen.

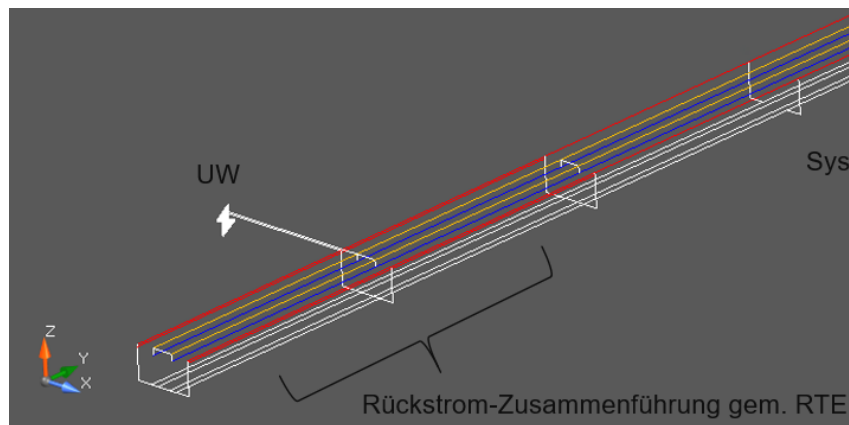


Abbildung 1.2: Simulationsmodell - Rückstrom-Zusammenführung im Bereich der Anspeisung aus dem Unterwerk (UW)

Um die Kopplungseffekte zwischen den Leitern und den Erdstromanteil gut abbilden zu können, wird das Modell in einer Länge von ca. 16 km simuliert. Aufgrund von Randeffekten kommt es zu Verzerrungen bei den Ergebnissen (vor allem beim Schienenpotential). Aus diesem Grund erfolgt die Darstellung der Ergebnisse nur auf einer Länge von ca. 10 km.

Das Triebfahrzeug ist generell auf beiden Gleisen bei 8 250 m angeordnet und ist als isolierter Leiter mit einem Längswiderstand von $150\,\Omega$ modelliert.

2. Theorie

Alle Berechnungen werden mit komplexen Zahlen berechnet und winkelgetreu summiert. Zur besseren Lesbarkeit werden bei vielen Darstellungen Absolutwerte verwendet. Dabei ist zu beachten, dass die bloße Summation der Absolutwerte nicht immer 100 % ergibt.

2.1. Kettenleiterberechnung

Die Kettenleiterberechnung einer Leitung basiert auf der rekursiven Berechnung des Kettenleiters, beginnend am Ende einer Leitung (z.B. Unterwerk). Beginnend bei dieser Abschlussimpedanz, werden sukzessiv die Längselemente addiert und mit dem folgenden Querelement als Parallelschaltung berechnet. Dabei werden die Teilimpedanzen von je 50-Meter-Gleisstücken berücksichtigt. Damit kann man die Kettenleiterwirkung an jedem Knotenpunkt berechnen (siehe Abb. 2.1).

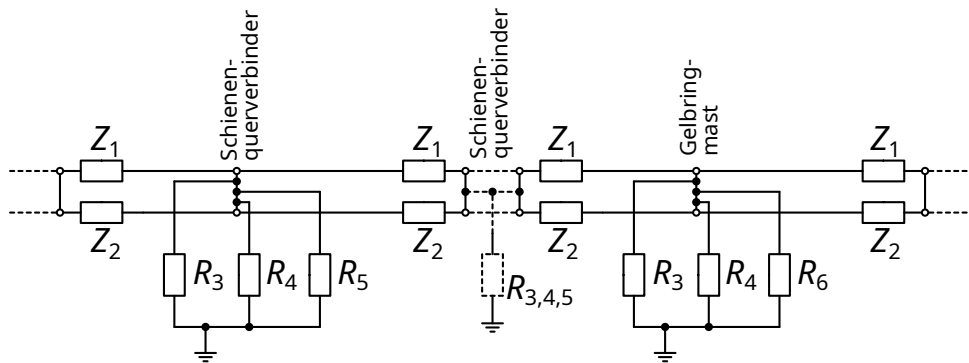


Abbildung 2.1: Kettenleitermodell einer zweigleisigen Bahnstrecke

2.2. Stromaufteilung

In jedem elektrischen Bahnsystem fließt der Strom vom Unterwerk über Speisekabel und der Oberleitung zur Traktionsmaschine und von dort über die Schienen und dem Rückleiter (das Rückleitersystem) wieder zurück zum Unterwerk. Der Rückstrom fließt in der Regel nicht ausschließlich im Rückleitungssystem, sondern auch im Erdreich. Dieser Erdstromanteil ist von verschiedenen Faktoren abhängig, insbesondere der geometrischen Anordnung des Systems (Abstände Hin- und Rückleiter), der Frequenz, usw. - für die Aussagen hinsichtlich der Erdströme wird auf den Abschnitt 3.3 verwiesen. Generell sind für die Berechnung alle ohmschen, kapazitiven und induktiven Kopplungen zu berücksichtigen - soweit dies möglich ist. Teilströme fließen in allen gekoppelten Teilen des Systems.

Die Ströme teilen sich auf verschiedene Stromwege auf. Abhängigkeiten können resultieren aus:

- Spezifischen Bodenwiderstand,
- Geometrie der Leiter,
- Schienenaufbau, Permeabilität der Schienen,
- Vorhandensein von Rückleiter und Verstärkungsleiter,
- Position und Anzahl der Verbindungsleiter (zwischen z.B. Rückleiter und Schienen (Schienen-Querverbindungen bzw. Mastanbindung) oder Verstärkungsleiter und Fahrdrabt/Tragseil)
- Erdungsimpedanzen,
- Position der Lasten (Triebfahrzeuge),
- Betriebsstrom der Triebfahrzeuge (beschleunigen/bremsen),
- Anspeisung der Gleisstrecke (ein- bzw. zweiseitige Anspeisung)

Dies führt insgesamt zu einer Orts- bzw. Zeitabhängigkeit der Ströme bzw. deren Aufteilung entlang einer Bahnstrecke.

Aufgrund der räumlichen Ausdehnung von Bahnsystemen ist der Ableitwert von stromführenden Strukturen (wie z.B. Schienen, Erdverbindungen, Fundamenten, usw.) ein wesentlicher Faktor. Auch wenn die Umhüllung des Schienensystems im $k\Omega \cdot m$ -Bereich liegt, tritt bei entsprechender Länge eine Kettenleiterwirkung ein: Der Ableitwert nähert sich einem Endwert, aufgrund dieses Ableitwertes kommt es zu einer konduktiven Verbindung mit der Erde und ein entsprechender Anteil des Stromes fließt durch die Erde zurück zum Unterwerk. Auch der Erdstrom ist ort- und zeitabhängig.

Weiters führen Umwelteinflüsse (wie z.B. Regen, Frost, Temperatur) zu Veränderungen des Ableitwertes.

2.3. Schienenpotential

Gemäß EN 50122-1 [1] sind die maximal erlaubten Berührungsspannungen mit $U_{T,p} = 60 \text{ V}$ angegeben.³⁾ Diese müssen für den Betriebs- und Kurzschlussfall bewertet werden. [1]

Das Potential gegen ferne Erde ist immer höher als die Berührungsspannung mit einer Greifdistanz von 1 m. Jedoch ist zu beachten, dass aufgrund von anderen (fremden) leitfähigen Materialien bzw. Leitungen, wie z.B. Fernmeldeleitungen oder Pipelines es zu einem Abgriff dieser Spannung kommen kann, da über diese ferne Erde in die Nähe gebracht werden kann bzw. bei Anbindung an diese fremde Struktur herausgeführt werden kann. Diese Spannungsverschleppung stellt somit eine worst-case Betrachtung dar.

Wenn daher das Schienenpotential den Grenzwert nicht überschreitet, ist damit die Berührungsspannungsgrenze immer eingehalten. Wenn andererseits das Schienenpotential höher als der

³⁾Hinweis: Für die maximal erlaubte Berührungsspannungen wird das Formelzeichen $U_{T,p}$ (permissible touch voltage) gemäß EN 50522 [2] verwendet.

erlaubte Grenzwert ist, bedeutet dies nicht zwingend, dass der Grenzwert für die Berührungsspannung überschritten wird. [1], [2] Denn, der für die Berührungsspannung relevante Strom ist jener Stromanteil, der an der jeweiligen Stelle ins Erdreich fließt und die Potentialanhebung (Spannungstrichter) verursacht. Aufgrund der guten Kopplung des Rückstromsystems, ist dieser Anteil sehr gering (Vergleich Reduktionsfaktor von Erdseilen bzw. Kabelschirmen) und daher die abzugreifende Berührungsspannung auch entsprechend niedrig.

Gemäß [1] sind 60 V für eine Langzeitwirkung von $t > 300$ s zulässig, dies stellt in der Regel den Betriebszustand dar. Für Kurzschlussströme, deren Abschaltzeiten i. A. kürzer ist, gelten gemäß [1] höhere zulässige Werte für die Berührungsspannung. Für 1 s: 75 V, für 0,1 s: 345 V. [1] Falls notwendig, können Standortparameter zusätzlich berücksichtigt werden.

Aus Sicherheitsgründen strebt die Allianz-Fahrweg generell einen rechnerischen Grenzwert von 50 V für die Berührungsspannung an, dieser wird nachfolgend auch in den Grafiken als Obergrenze dargestellt.

In [1], Anhang D, werden Richtwerte für die Berührungsspannung in Abhängigkeit von Distanz zum Schienensystem und dem Schienenpotential dargestellt. So sind für die Berührungsspannung U_T für eine Greifdistanz von 1 m folgende Werte zu erwarten:

$$U_T = U_{RP} = 30 \% \cdot U_{RE} \quad (1)$$

$$U_{T,p} = U_{te,max} = 50 \text{ V} \quad (2)$$

Wobei gilt:

$U_T = U_{RP}$... Berührungsspannung

$U_{T,p} = U_{te,max}$... maximal erlaubte Berührungsspannung

U_{RE} ... Schienenpotential

2.4. Berechnungsprogramm

Die numerischen Berechnungen werden mit dem Programm XGSLab⁴⁾ „XGSA FD“ durchgeführt. [3] XGSA FD (Over and Underground Grounding System Analysis in the Frequency Domain) ist für die allgemeine Analyse von ober- und unterirdischen Energiesystemen geeignet. Die Software benutzt dabei die PEEC-Methode (Partial-Element-Equivalent-Circuit). Dabei handelt es sich um ein numerisches Verfahren zur Berechnung von elektromagnetischen Feldproblemen. In diesem werden verteilte Systeme (z.B. Leitungen, Rohrleitungen, usw.) in geeigneter Weise unterteilt diskretisiert und in Π -Ersatzglieder umgewandelt. Die einzelnen Glieder dieser Ersatzschaltungen (partielle Elemente) werden entsprechend ihrer Feldgleichungen berechnet. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass alle auftretenden Komponenten in diskreten Elementen (Quellen, Widerstände, Spulen, Kondensatoren) umgewandelt werden. Diese Methode lässt sich auch mit anderen Netzwerken koppeln, sodass der Einfluss von z.B. elektromagnetischen Feldern auf Netzwerkstrukturen analysiert werden kann. Mit dem Programm können effizient

⁴⁾Version: 2024.1.23

und genau Erdungsanlagen und Effekte von induktiven, kapazitiven und ohmschen Kopplungen untersucht werden.

Generell sind die Werte, ohne gesonderte Kennzeichnung, für eine Netzfrequenz von $f = 16,7 \text{ Hz}$, sowie bei einem spezifischen Bodenwiderstand von $\varrho = 100 \Omega \text{ m}$ zu verstehen. Sich davon unterscheidende Werte sind an den jeweiligen Stellen angegeben.

2.5. Weitere Effekte aufgrund von elektrischen Anlagen

2.5.1. Magnetische Felder

Die magnetische Flussdichte einer Leiterkonfiguration, z.B. der stromführenden Leiter elektrifizierter Bahnstrecken oder Netze öffentlicher Versorgung, kann analytisch aus der Superposition von Teilfeldern der (in einzelne Teilsegmente unterteilten) Leiter berechnet werden.

Die wesentlichen Einflussgrößen für das magnetische Feld bei Freileitungen bzw. elektrifizierten Gleisanlagen sind:

- die geometrische Anordnung der Leiter
- das Vorhandensein von passiven Leitern wie Erdseile bzw. Rückleiter
- die Stromaufteilung auf die einzelnen Leitern

2.5.2. Elektrische Felder

Niederfrequente elektrische Felder, verursacht durch die Betriebsspannung elektrischer Anlagen der öffentlichen Energieversorgung, können für die bei dieser Untersuchung relevanten Felder als quasi-stationär betrachtet werden.

Der Einfluss des Erdbodens kann im Gegensatz zur Magnetfeldberechnung nicht vernachlässigt werden. Der Erdboden stellt gegenüber dem hochohmigen Widerstand der Umgebungsluft einen nahezu idealen Leiter dar. Die elektrischen Feldlinien stehen somit nahezu senkrecht auf den Erdboden.

Die wesentlichen Einflussgrößen für das elektrische Feld bei Freileitungen und elektrifizierten Gleisanlagen sind:

- die geometrische Anordnung der Leiter,
- die Seildurchmesser,
- der Abstand der Leiter zum Boden,
- die Leiter-Erde-Spannung,
- Verbindung zu anderen Leitern

Der ungünstigste Betriebszustand für die Berechnung der elektrischen Felder bei elektrischen Anlagen ist im Gegensatz zu magnetischen Feldern auf Basis der höchsten auftretenden Spannung zu bestimmen.

3. Ergebnisse

3.1. Einleitung

In den folgenden Abschnitten sind die Ergebnisse dargestellt.

Alle Berechnungen werden mit komplexen Zahlen berechnet und winkelgetreu summiert. Zur besseren Lesbarkeit werden bei vielen Darstellungen Absolutwerte verwendet. Dabei ist zu beachten, dass die bloße Summation der Absolutwerte nicht immer 100 % ergibt.

Exemplarisch, sei an dieser Stelle auf das komplexe Zeigerdiagramm in Abb. 3.1 verwiesen, in der die komplexe Summe der Teilströme dargestellt ist. Es zeigt, dass die entsprechende Summe aller Ströme im Knoten 0 wird (gemäß Knotenregel nach Kirchhoff). Diese Darstellung ist aber für die statistische Auswertung entlang der Strecke nicht sinnvoll nutzbar.

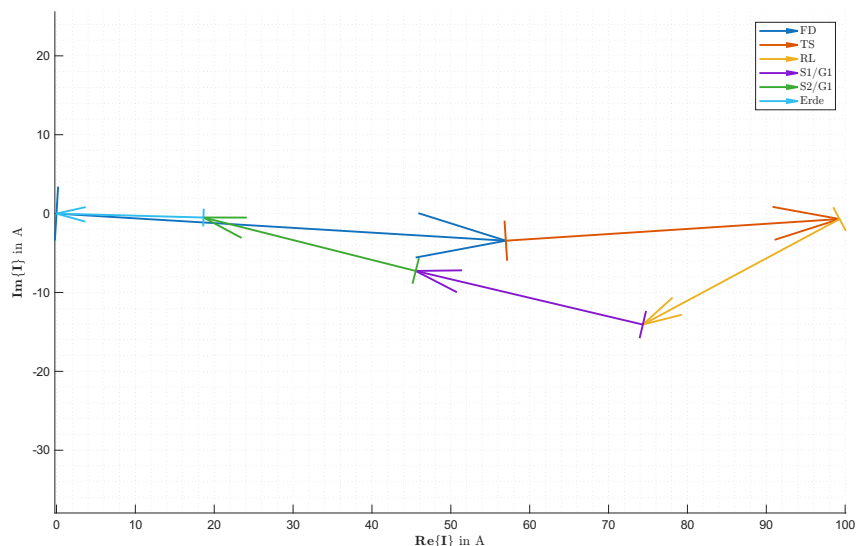


Abbildung 3.1: Zeigerdiagramm: Stromaufteilung bei 3 400 m - System: BLS

Diagramme mit Schattierung bzw. die Boxplots stellen eine Art der statistischen Auswertung dar. In diesen Diagrammen werden die Mittelwerte und Minimal- bzw. Maximalwerte als Schwankungsbreite dargestellt.

In den Darstellungen ist nur ein Gleis dargestellt, bei der zweigleisigen Anordnung sind beide Systeme symmetrisch, d.h. auf dem zweiten Gleis steht ebenfalls ein Triebfahrzeug in derselben Konfiguration. Die Stromwerte sind daher im Vergleich zum gesamten System halbiert.

3.2. Kettenleiterimpedanzen

Das Schienensystem samt Rückleitungsführung ist eine sehr große, verteilte Erdungsanlage. Betrachtet man dieses verteilte System von einem Punkt aus, so wirkt an dieser Stelle der Kettenleiter.

In Abbildung 3.2 sind die, wirksamen Kettenleiterimpedanzen an der jeweiligen Entfernung zum UW für einen spezifischen Bodenwiderstand von $\varrho = 100 \Omega \text{ m}$ dargestellt. Die Varianten für die übrigen spezifischen Bodenwiderstände sind im Anhang enthalten.

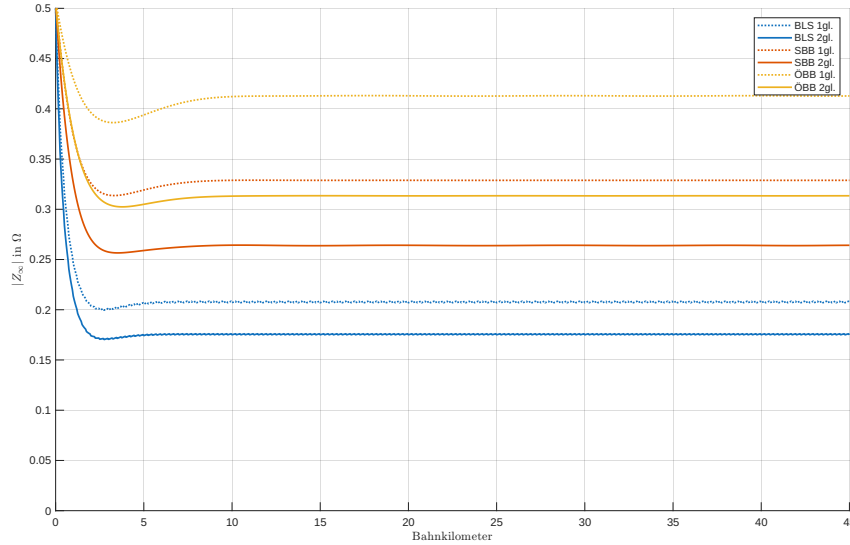
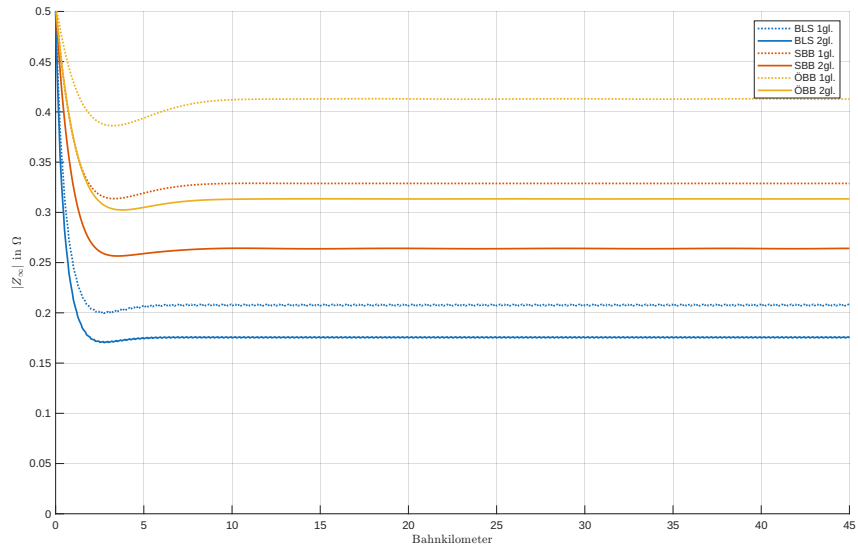


Abbildung 3.2: Kettenleiterimpedanzen für die ein- bzw. zweigleisige Strecke bei $\varrho = 100 \Omega \text{ m}$ mit einer Anfangsimpedanz $Z_A = 0,5 \Omega$

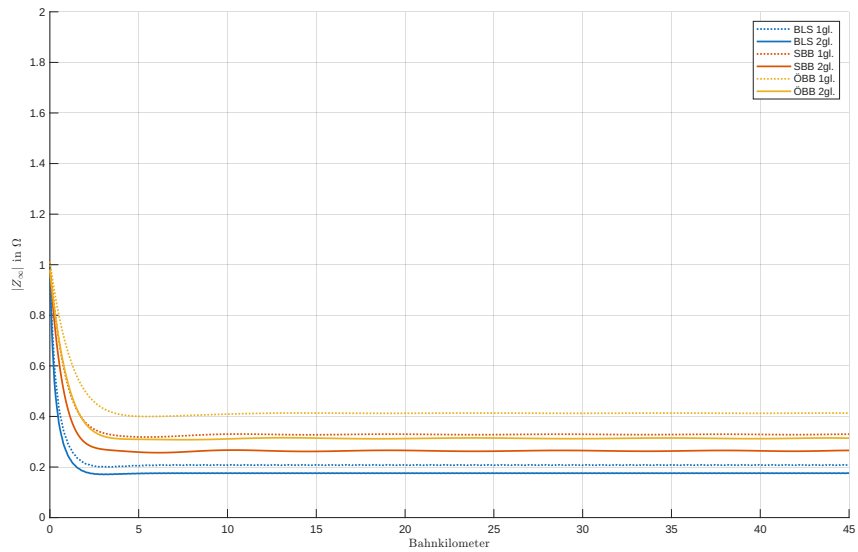
Diese Kettenleiterimpedanzen sind im Wesentlichen von den im Querschnitt wirkenden Impedanzen (Erdungsimpedanzen) abhängig. Damit spielt die Anfangsimpedanz eine untergeordnete Rolle für den Endwert (siehe zum Vergleich Abb. 3.3). Es zeigt sich, dass die Kettenleiterimpedanz einen Endwert zwischen 5 km ... 40 km für $\varrho = 50 \Omega \text{ m} \dots 1000 \Omega \text{ m}$ erreicht.

Vergleicht man das zweigleisige Schienenmodell (System BLS) mit der Kettenleiterimpedanz aus 3.3a, das nach ca. 7 km der Wert von $Z_{\infty, \text{BLS}, 100} = 0,2 \Omega$ (Tab. ??) erreicht, erkennt man, dass das zweigleisige Schienenmodell der BLS bei einer Länge von ca. 9 km eine Erdungsimpedanz von $Z_{\text{E}, \text{BLS}, 9 \text{ km}} = 0,34 \Omega \angle 30^\circ$ aufweist. Grund für diese Abweichung ist, dass bei der Kettenleiterimpedanz-Berechnung die Erdungswiderstände der Schienen, Mastanbindungen bzw. Schienen-Querverbindungen als unabhängig angesehen werden. In der Simulation im Modell werden jedoch die Kopplungen zueinander berücksichtigt.

Die ermittelten Kettenleiterimpedanzen in Abhängigkeit des spezifischen Bodenwiderstandes, sowie dem verwendeten Rückführungssystem, sind in Tab. ?? (eingleisige Strecke) und Tab. ?? (zweigleisige Strecke) angeführt.



(a) Kettenleiterimpedanzen bei $\varrho = 50 \Omega \text{ m}$ mit einer Anfangsimpedanz $Z_A = 0,5 \Omega$



(b) Kettenleiterimpedanzen bei $\varrho = 50 \Omega \text{ m}$ mit einer Anfangsimpedanz $Z_A = 1 \Omega$

Abbildung 3.3: Vergleich der Kettenleiterimpedanzen für unterschiedliche Startimpedanzen des Unterwerks

Tabelle 3.1: Kettenleiterimpedanzen für die eingleisige Strecke bei variierendem spez. Bodenwiderstand

ϱ $\Omega \text{ m}$	BLS	SBB $\Omega \angle^\circ$	ÖBB
50	0,3 $\angle$ 45,0	0,4 $\angle$ 33,7	0,5 $\angle$ 36,9
100	0,4 $\angle$ 33,7	0,5 $\angle$ 36,9	0,6 $\angle$ 38,7
500	0,7 $\angle$ 33,7	1,1 $\angle$ 33,7	1,4 $\angle$ 30,3
1 000	0,9 $\angle$ 32,0	1,5 $\angle$ 31,6	1,9 $\angle$ 32,0

Tabelle 3.2: Kettenleiterimpedanzen für die zweigleisige Strecke bei variierendem spez. Bodenwiderstand

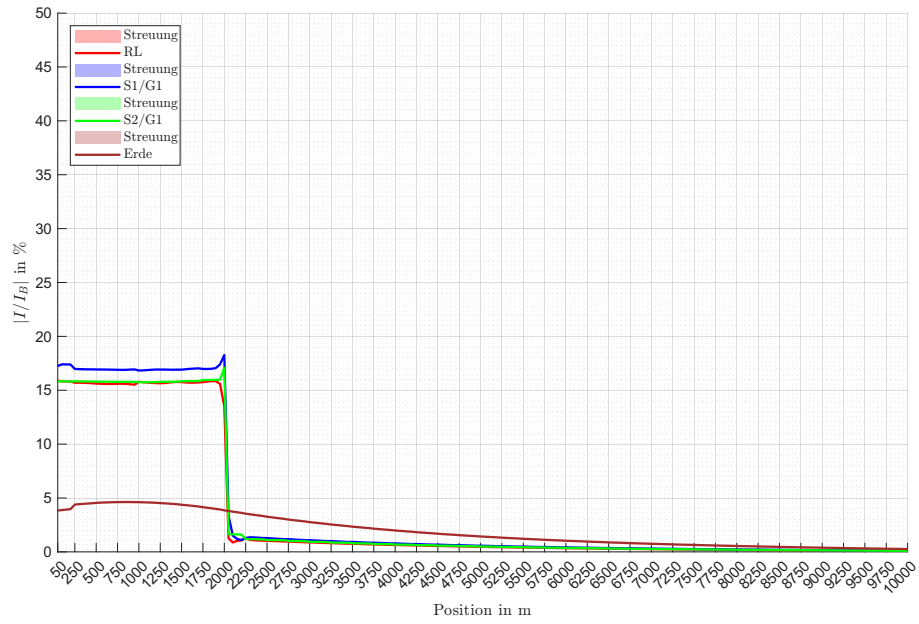
ϱ $\Omega \text{ m}$	BLS	SBB $\Omega \angle^\circ$	ÖBB
50	0,2 $\angle$ 26,6	0,4 $\angle$ 33,7	0,4 $\angle$ 33,7
100	0,4 $\angle$ 33,7	0,4 $\angle$ 26,6	0,5 $\angle$ 36,9
500	0,6 $\angle$ 31,0	0,9 $\angle$ 32,0	1,0 $\angle$ 29,1
1 000	0,8 $\angle$ 29,7	1,3 $\angle$ 28,6	1,5 $\angle$ 31,6

3.3. Erdstromanteil

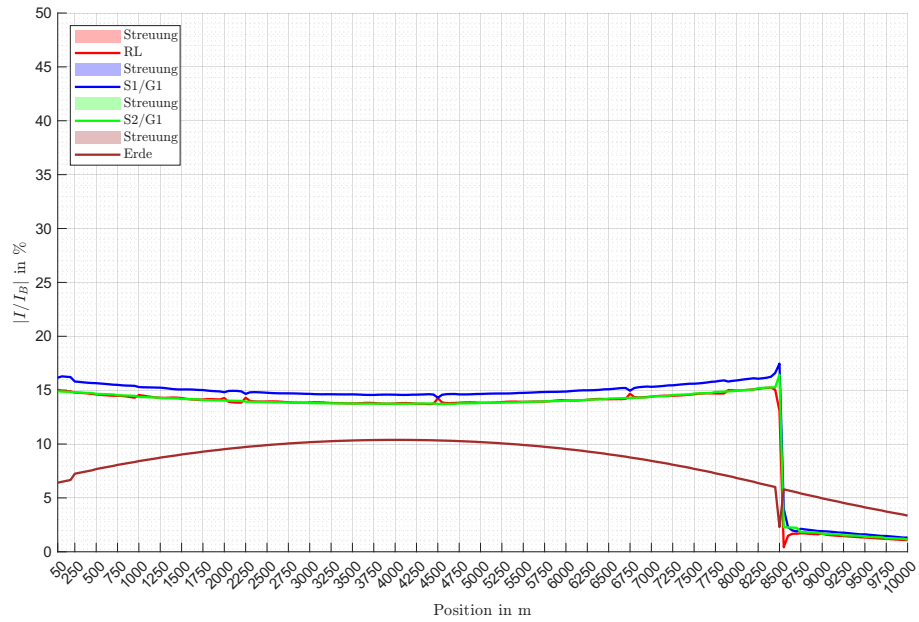
Der Erdstromanteil ist maßgeblich von der Ausdehnung des Schienensystems sowie der Position des Triebfahrzeuges (Entfernung der Last) abhängig. Dies ist aus Abbildung 3.4 ersichtlich. Für Triebfahrzeuge, die sich weit vom speisenden Unterwerk entfernt befinden, ist der Erdstromanteil größer. Aufgrund der Kopplungsmechanismen tritt der größte Erdstromanteil in der Mitte der Strecke auf.

Neben der Ankopplung an das Erdreich, etwa durch erdführlige Leiter oder der Schienen über das Gleisbett, bestimmt die Entfernung zum versorgenden Unterwerk wesentlich den Erdstromanteil. Dies wird in den Abbildungen 3.4 illustriert. Hier ist erkennbar, dass für weniger weit entfernten Orte für den Standort des Zuges, eine geringere Einkopplung ins Erdreich stattfinden, wohingegen es bei weit entfernten es bis zu 33 % des Betriebsstroms sind. Zu einem höheren Anteil, auch bei noch weiter entfernten Standorten kommt es im Allgemeinen nicht.

In Bezug auf die Fragestellung - der unterschiedlichen Abstände der Schienen-Querverbindungen sowie der Masterdung in den Rückstromführungssystemen - hat sich gezeigt, dass bei geringeren Abständen (wie im System BLS) im Vergleich zu großen Abständen (System ÖBB) diese Sättigung des Erdstroms im Erdreich näher beim UW eintritt. So wird im System BLS, die maximale Einkopplung bereits bei ca. 6 000 m erreicht, beim System ÖBB erst bei ca. 10 000 m. Das System SBB liegt dazwischen.



(a) Stromaufteilung im Verhältnis zum Betriebsstrom entlang der Strecke, Position des Triebfahrzeuges bei 2050 m



(b) Stromaufteilung im Verhältnis zum Betriebsstrom entlang der Strecke, Position des Triebfahrzeuges bei 8550 m

Abbildung 3.4: Stromaufteilung für eine zweigleisige Strecke bei $\rho = 100 \Omega \text{ m}$ für unterschiedliche Positionen des Triebfahrzeuges, System BLS

3.4. Rückstromführungssystem

In diesem Abschnitt sind die Auswirkungen der Parameter spezifischer Bodenwiderstand und Querschnitt der Schienen-Querverbindungen dargestellt. Die Variante: „Entfall der Schienen-Querverbindungen“, gleichzusetzen mit einem Querschnitt von 0, sind in den Abbildungen separat angeführt. Diese Variante führt dazu, dass kein Strom im Rückleiter fließt und der gesamte Rückstrom damit in den Schienen zurück zum UW fließt.

Die Darstellung zeigt nur das System eines Gleises. Am zweiten Gleis fließen dieselben Ströme. Ein Ausgleich der Ströme findet an den Schienen-Querverbindungen statt.

Die Schienen-Querverbindungen bzw. Mastanbindungen sind in den meisten Fällen gering belastet, die Stromwerte liegen im Bereich von $< 5\%$ bezogen auf den Betriebsstrom. Lediglich die Schienen-Querverbindungen bzw. Mastanbindungen nahe der Position des Triebfahrzeuges werden höher belastet, deren Belastung liegt bei rund 15% für die Verbindung direkt neben dem Triebfahrzeug. Auch der Einfluss des Querschnitts und des spezifischen Bodenwiderstands beschränkt sich auf die Schienen-Querverbindungen bzw. Mastanbindungen, die unmittelbar beim Triebfahrzeug positioniert sind.

Es zeigt sich, dass der Rückstrom unmittelbar in den Rückleiter abgeleitet wird.

Es ergibt sich, dass pro Gleis vom gesamten Betriebsstrom (bei Berücksichtigung der Variante, dass die **Schienen-Querverbindungen entfallen**):

- ca. 17% in Schiene 1,
- ca. 16% in Schiene 2,
- ca. 12% im Rückleiter und
- ca. 9% im Erdreich,

fließen.

Betrachtet man das gesamte System (beide Gleise) ergeben sich folgende Aufteilungen:

- ca. 66% in den Schienen,
- ca. 25% in den Rückleitern und
- ca. 20% im Erdreich.

Die Auswirkungen von Querschnitt und Veränderung des spezifischen Bodenwiderstands verursachen eine Schwankungsbreite von rund 5% für Schienen, Rückleiter und Erdreich.

Im Bereich des UWs zeigt sich ein entsprechender Anstieg in der Belastung der Schienen-Querverbindungen, die den Strom sammeln und ins UW rückführen, insbesondere jene bei Position -50 in Abbildung 3.6.

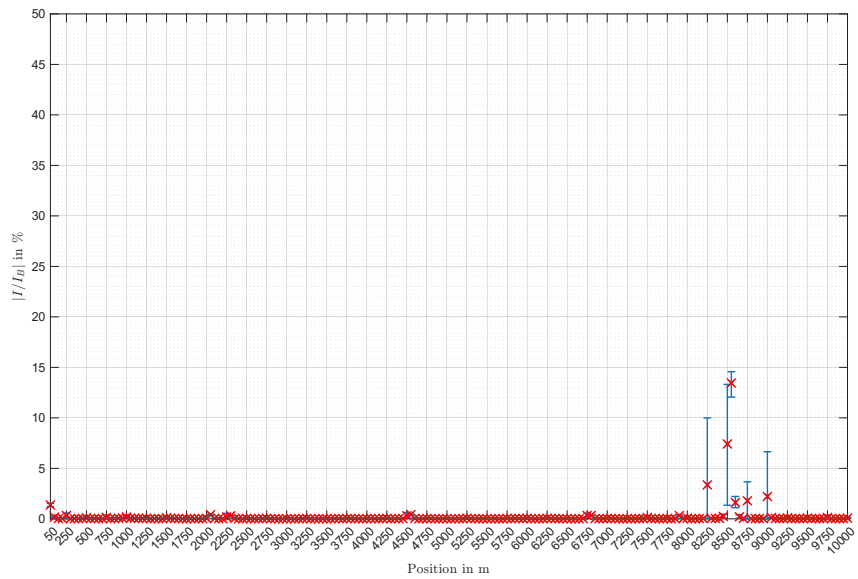


Abbildung 3.5: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom: Übersicht aller Varianten

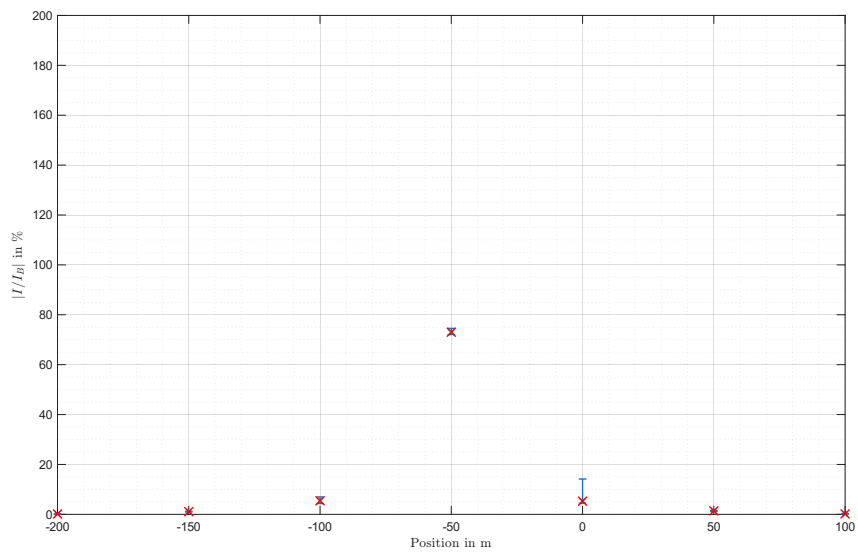


Abbildung 3.6: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom: Übersicht aller Varianten - im Bereich des UWs

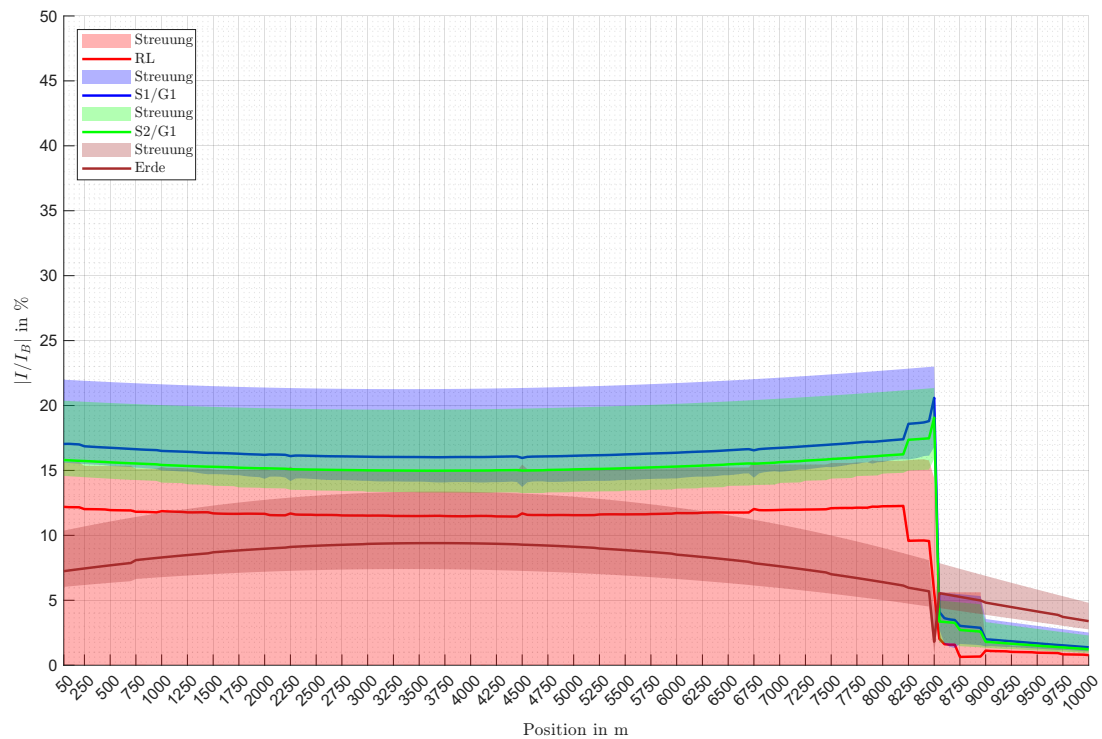


Abbildung 3.7: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem - Übersicht aller Varianten

Die folgenden Abbildungen zeigen die Strombelastungen für alle Varianten, wobei der Wegfall der Schienen-Querverbindungen **nicht** berücksichtigt wird.

Daraus folgt, dass:

- ca. 16 % in Schiene 1,
- ca. 15 % in Schiene 2,
- ca. 15 % im Rückleiter und
- ca. 8 % im Erdreich,

des Betriebsstroms fließen.

Betrachtet man das für das gesamte System (beide Gleise) ergeben sich folgende Aufteilungen:

- ca. 62 % in den Schienen,
- ca. 30 % in den Rückleitern und
- ca. 17 % im Erdreich.

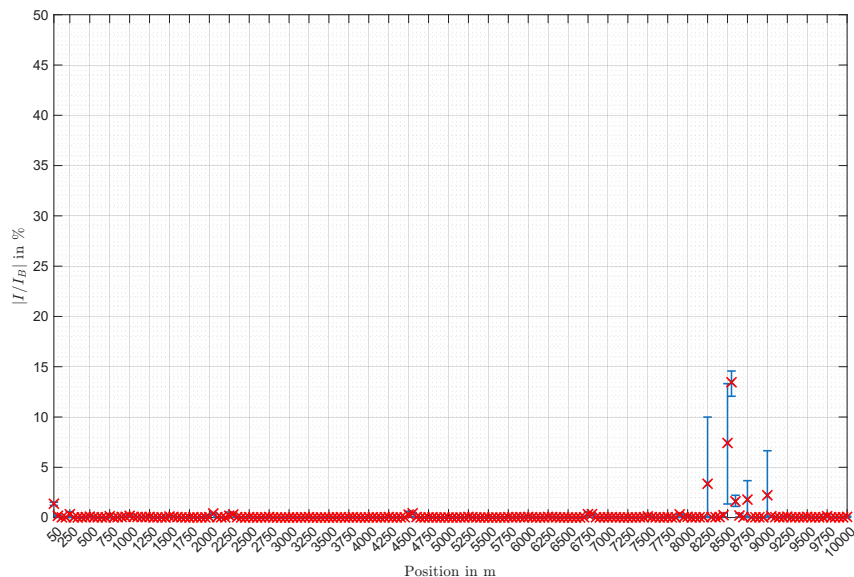


Abbildung 3.8: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom: Übersicht aller Varianten (ohne Entfall der Schienen-Querverbindungen)

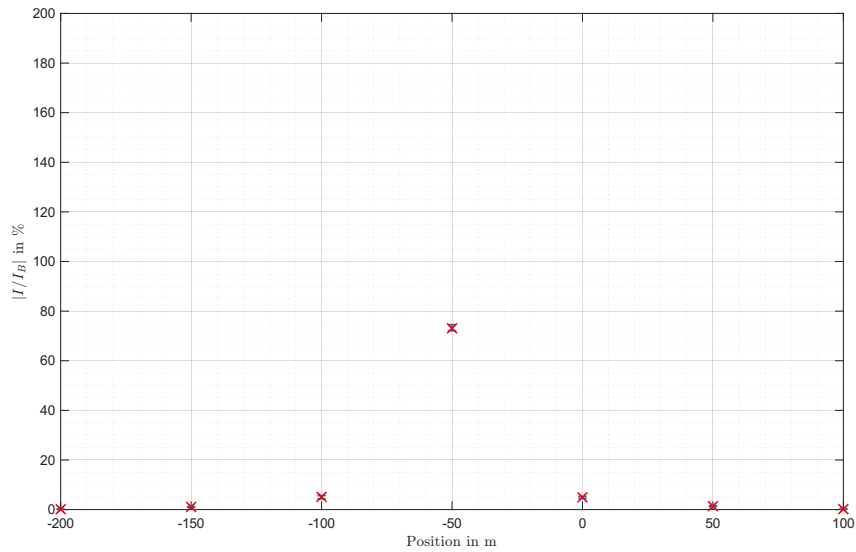


Abbildung 3.9: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom: Übersicht aller Varianten - im Bereich des UWs (ohne Entfall der Schienen-Querverbindungen)

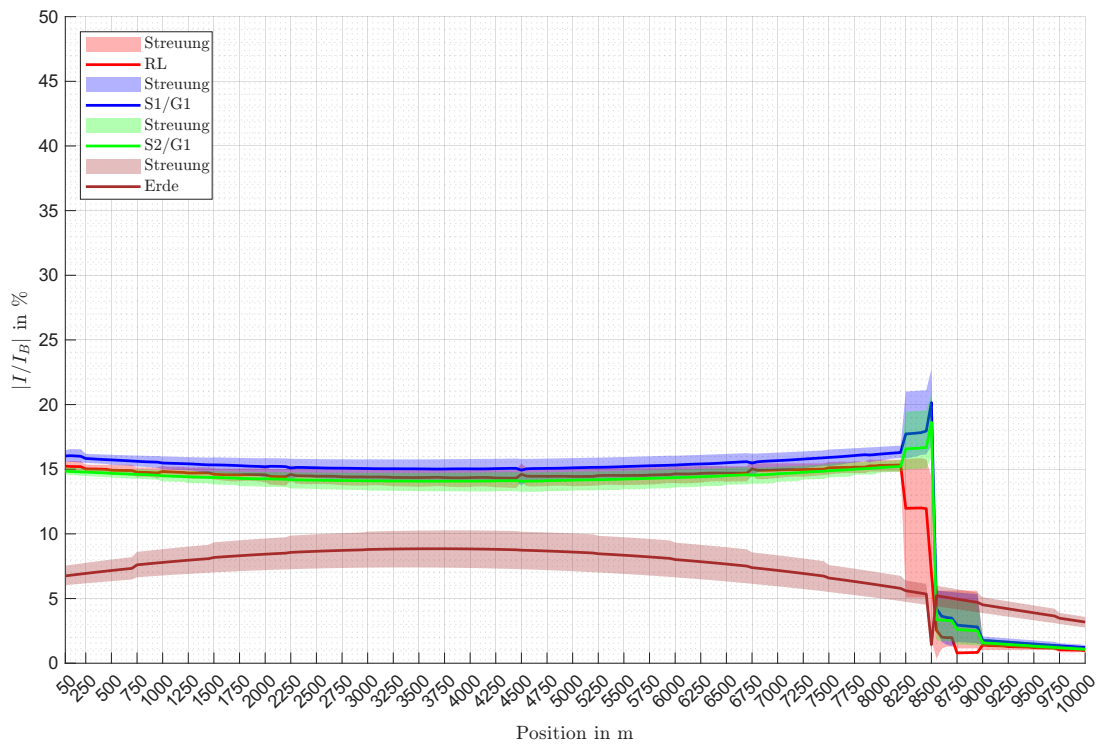


Abbildung 3.10: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem - Übersicht aller Varianten (ohne Entfall der Schienen-Querverbindungen)

3.5. Schienenpotentiale

In den folgenden Abbildungen 3.11 werden die Schienenpotentiale gegen ferne Erde dargestellt.

Die Berührungsspannung wird nicht direkt berechnet, sondern nur gemäß [1] vom Schienenpotential abgeleitet, diese ist somit ein Richtwert! Weiters stellt die Hochrechnung mit dem Bezug zum Betriebsstrom auch nur eine Abschätzung für den Kurzschlussfall dar, da der Zusammenhang zwischen Betriebsstrom und Schienenpotential nicht direkt proportional ist.

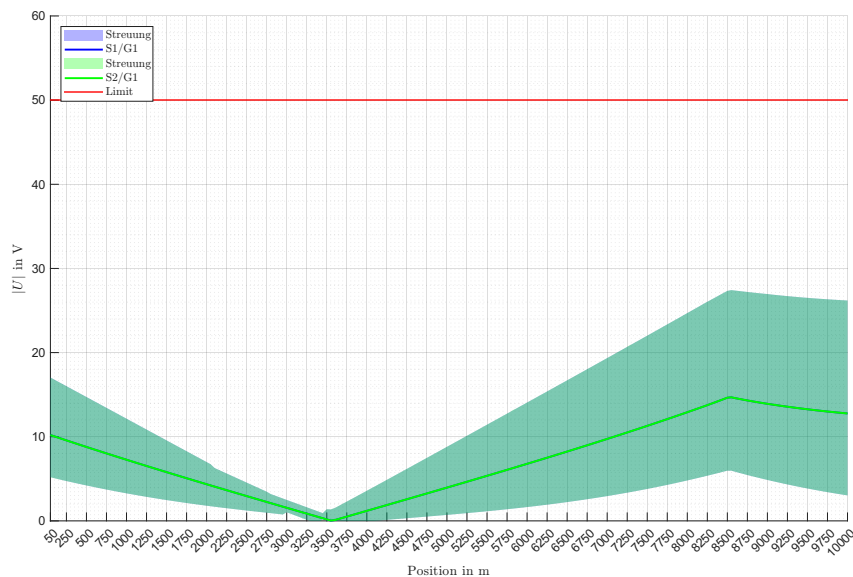


Abbildung 3.11: Schienenpotential: Übersicht aller Varianten

In Abbildung 3.12 ist das Schienenpotential als relative Größe auf den Betriebsstrom bezogen dargestellt und auf den Strom von 1 kA hochgerechnet. Diese Abbildung stellt weiters auch die Berührungsspannung dar, berechnet gemäß (1). Es ist zu beachten, dass die Schienenpotentiale sich ändern, je nachdem wo und wie viele Triebfahrzeuge sich im Gleissystem befinden, siehe die entsprechenden Abbildungen im Anhang. Darum ist auch die Hochrechnung lediglich eine Abschätzung.

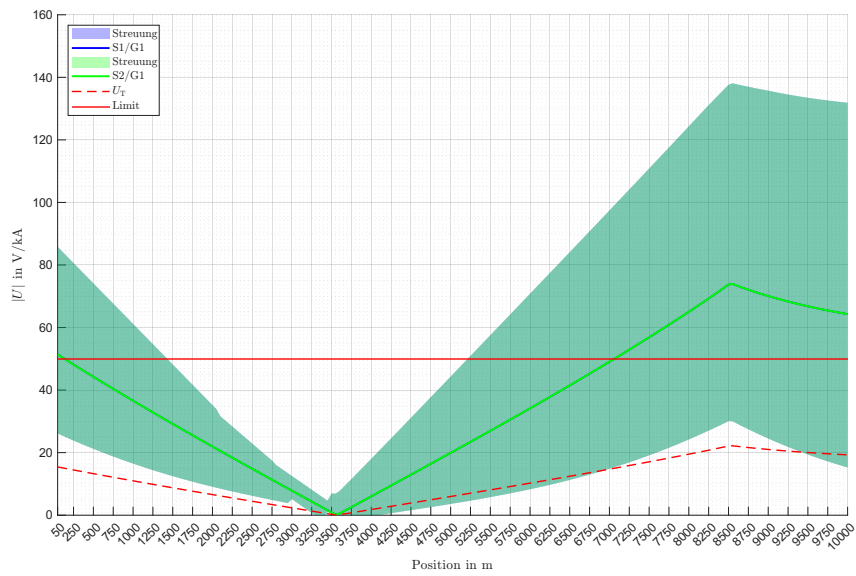


Abbildung 3.12: Schienenpotential: Übersicht aller Varianten - relative Darstellung bezogen auf den Betriebsstrom. Die Berührungsspannung (rot strichliert) ist vom Mittelwert des Schienenpotentials abgeleitet. Auf die Darstellung des Schwankungsbereichs wird verzichtet.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen das Schienenpotential ohne Entfall der Schienen-Querverbindungen.

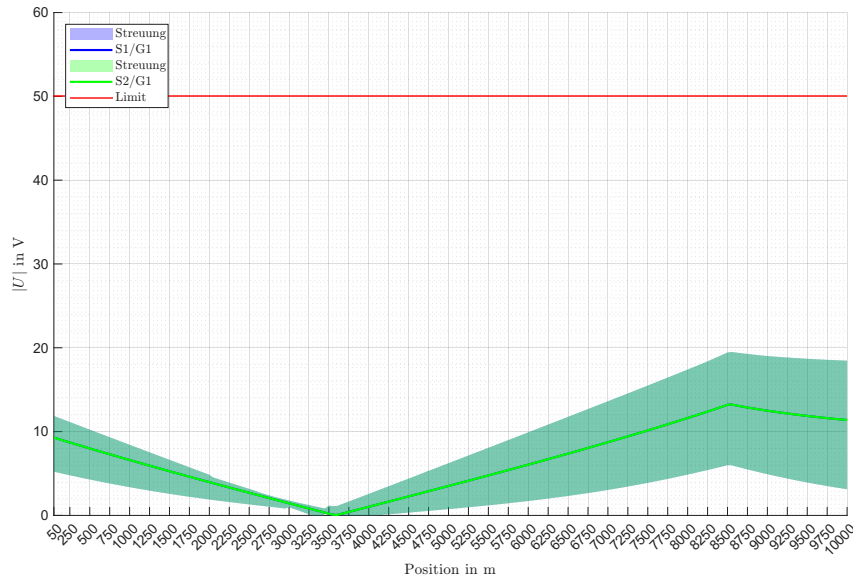


Abbildung 3.13: Schienenpotential: Übersicht aller Varianten (ohne Entfall der Schienen-Querverbindungen)

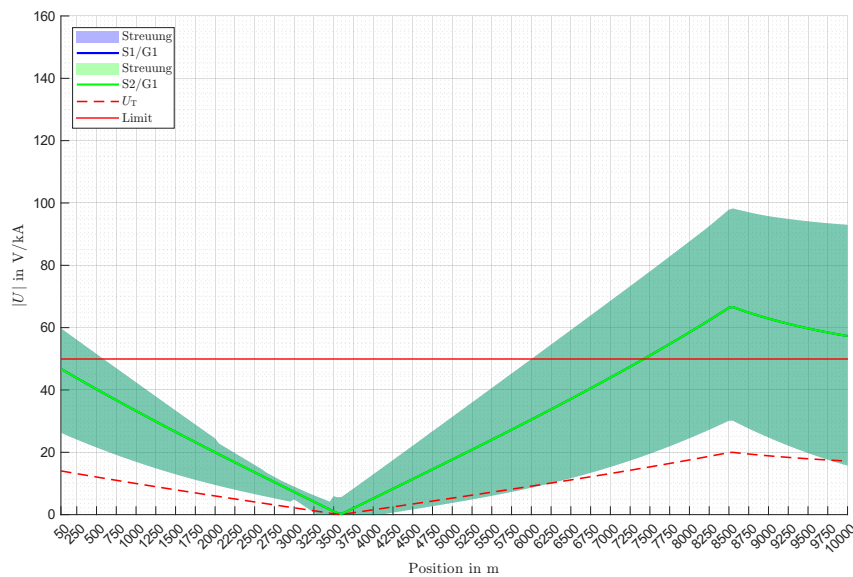


Abbildung 3.14: Schienenpotential: Übersicht aller Varianten (ohne Entfall der Schienen-Querverbindungen) - relative Darstellung bezogen auf den Betriebsstrom. Die Berührungsspannung (rot strichliert) ist vom Mittelwert des Schienenpotentials abgeleitet. Auf die Darstellung des Schwankungsbereichs wird verzichtet.

4. Zusammenfassung

Es wird die Stromaufteilung in verschiedenen Bahnsysteme untersucht. Das analysierte Modell ist zweigleisig, ca. 16 km lang, in den Untersuchungen wird der Querschnitt der Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen sowie der spezifische Bodenwiderstand variiert. Dabei werden unterschiedliche Anordnungen der Schienen-Querverbindungen bzw. Mastanbindungen berücksichtigt werden, diese sind ausgewählt gemäß:

- System BLS,
- System SBB,
- System ÖBB

Es ergibt sich:

Es zeigt sich, dass sich bei den untersuchten Konfigurationen der Betriebsstrom folgendermaßen aufteilt:

- $\approx 62\%$: Schienen,
- $\approx 30\%$: Rückleiter
- $\approx 17\%$: Erdreich
- $< 5\%$: Schienenquerverbindungen

Die Stromaufteilung ist maßgeblich von der Ausrüstung der Gleise und Geometrie abhängig. Der spezifische Bodenwiderstand bzw. der Querschnitt der Schienenquerverbinde-/Mastanbindung haben keinen wesentlichen Einfluss auf die Aufteilung.

Der unmittelbare Schienenquerverbinder im Bereich der Rückführung ins UW führt bis zu 80 % des Betriebsstroms.

Die abgeleitete Berührungsspannung liegt bei weniger als 50 V/kA.

Kettenleiterimpedanz

Der Ausbreitungswiderstand des Systems nimmt nach einer Systemlänge von 5 km ... 40 km einen konstanten Wert an. Dieser beträgt gerundet für eine eingleisige Strecke $0,3\,\Omega \dots 1,9\,\Omega$ und für eine zweigleisige Strecke $0,2\,\Omega \dots 1,5\,\Omega$. Die Entfernung nachdem der Endwert erreicht wird, wird maßgeblich vom Abstand der Schienenquerverbindungen beeinflusst.

Erdstromanteil

Der Erdstromanteil ist wesentlich von der Position der Triebfahrzeuge auf der Strecke abhängig. Für Positionen nahe des UWs sind die Erdstromanteile geringer, für entfernte Positionen steigen die Erdstromanteile an. Für das Gesamtsystem betrachtet ergibt sich eine Schwankung zwischen 0 % ... 30 %, bezogen auf den Betriebsstrom.

Rückstromführung

Bis auf die Schienenquerverbindungen im Bereich des UWs, sowie des Triebfahrzeuges sind die Strombelastungen $< 5\%$, bezogen auf den Betriebsstrom. Die Schienenquerverbindungen im Bereich des Triebfahrzeuges werden mit rund 15 % belastet, im Bereich der Rückführung in das UW liegt die Belastung bei rund 80 %.

Es ergibt folgende Stromaufteilung pro Gleis von **bei Berücksichtigung des Entfalls der Schienen-Querverbindungen**:

- $\approx 17\%$ in Schiene 1,
- $\approx 16\%$ in Schiene 2,
- $\approx 12\%$ im Rückleiter und
- $\approx 9\%$ im Erdreich,

Bezogen auf das Gesamtsystem lauten die Aufteilungen:

- $\approx 66\%$ in den Schienen,
- $\approx 25\%$ in den Rückleitern und
- $\approx 20\%$ im Erdreich.

Werden hingegen nur die Fälle berücksichtigt, bei denen der Rückleiter angebunden ist, ergibt sich:

- $\approx 62\%$ in den Schienen,
- $\approx 30\%$ in den Rückleitern und
- $\approx 17\%$ im Erdreich.

Schienenpotential

Das Schienenpotential ist zwar auch vom Betriebsstrom abhängig (ähnlich wie die Stromaufteilung), jedoch nicht direkt proportional. D.h. Zwar führt ein Anstieg des Stroms, z.B. aufgrund von mehr Zügen, oder im Kurzschlussfall, zu höheren Schienenpotentialen, aber nicht direkt proportional. Als worst-case Abschätzung, kann das aber angenommen werden. Grund dafür kann sein, dass der Betriebsstrom maßgeblich von den Schleifenimpedanzen abhängt, der gesamte Ausbreitungswiderstand des Bahnsystems bleibt konstant, die Veränderungen in der Position der Triebfahrzeuge führt andererseits auch zu einer Veränderung des anteiligen Ausbreitungswiderstandes. Die genauen Untersuchungen des Schienenpotentials, waren nicht Gegenstand in den Untersuchungen, sondern wurden aus den durchgeführten Simulationen mit als Ergebnis angeführt.

Das Schienenpotential kann gemäß [1] als Richtwert für die Berührungsspannung herangezogen werden. In den durchgeführten Simulationen liegt das Schienenpotential im Bereich von $0 \text{ V/kA} \dots 140 \text{ V/kA}$. In einer worst-case Abschätzung liegt die Berührungsspannung im Mittel bei $0 \text{ V/kA} \dots 23 \text{ V/kA}$.

Technische Unterlagen

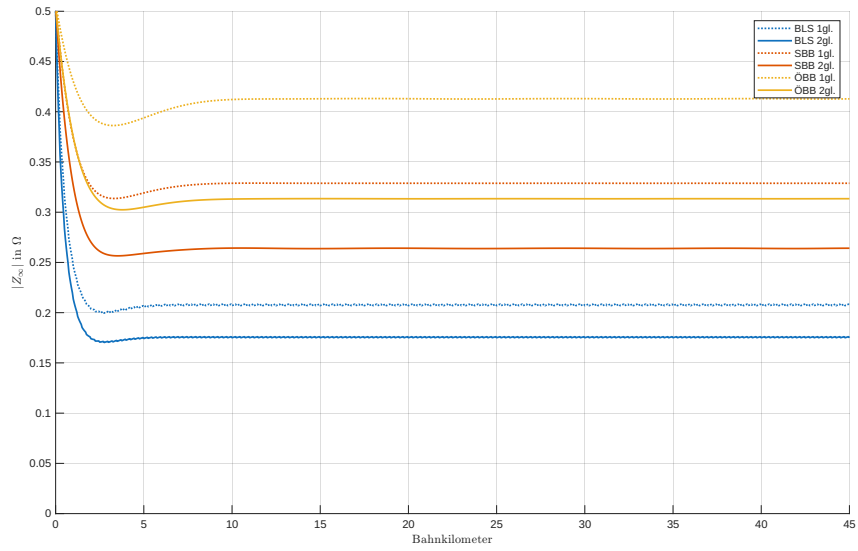
[T1] RTE 27900 - Rückleitungs- und Erdungshandbuch, 2008-11-01.

Literatur

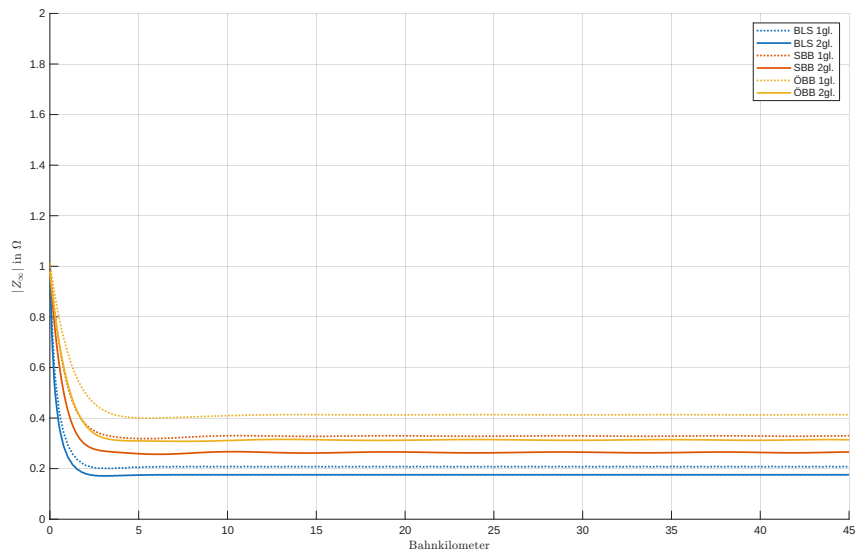
- [1] EN 50122-1, Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung, Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag, 2023-03-01.
- [2] EN 50522, Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV, 2023-11-01.
- [3] Srl., S., XGSLab - Electromagnetic Simulation for Power Systems, Grounding, Interference and Lightning.

A. Anhang

A.1. Kettenleiterimpedanzen

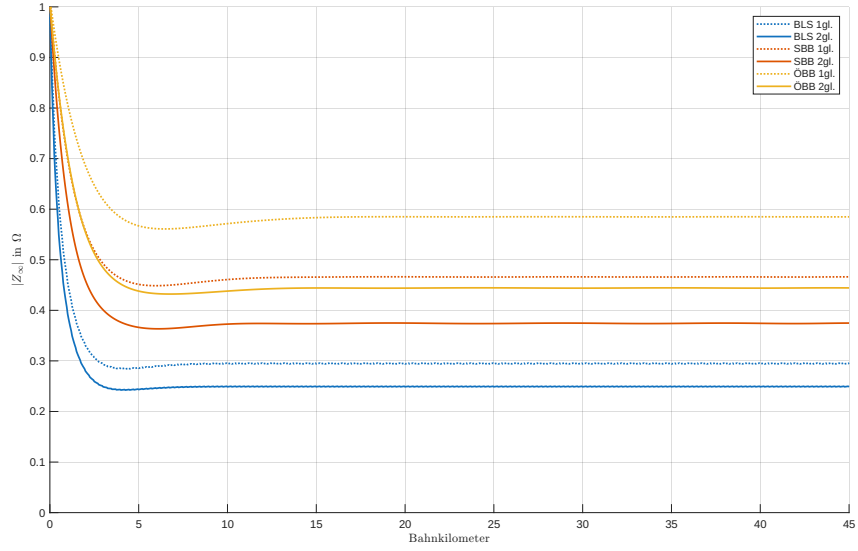


(a) Anfangsimpedanz $Z_A = 0,5 \Omega$

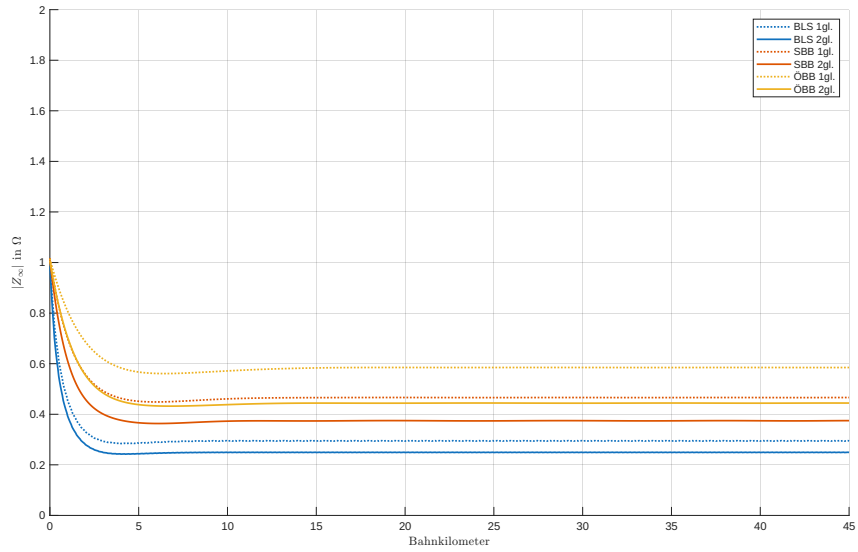


(b) Anfangsimpedanz $Z_A = 1 \Omega$

Abbildung A.1.1: Vergleich der Kettenleiterimpedanzen bei $\varrho = 50 \Omega \text{ m}$ für unterschiedliche Anfangsimpedanzen des Unterwerks

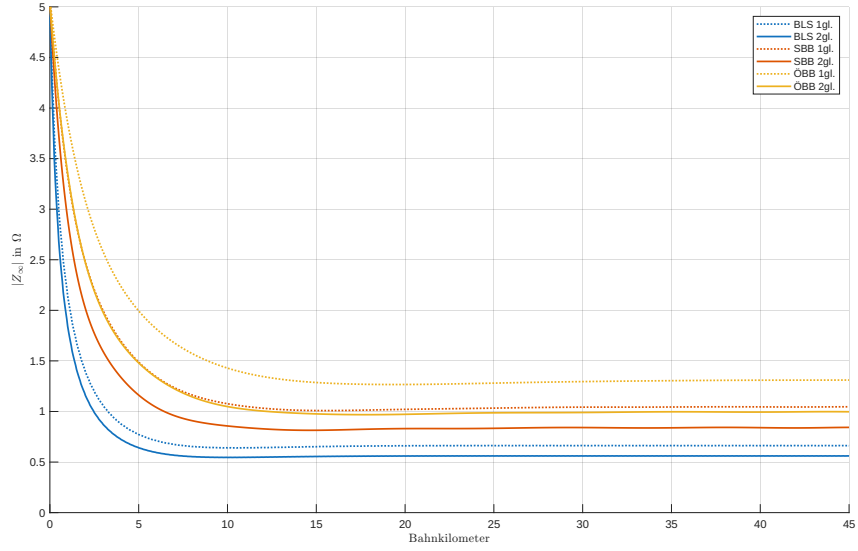


(a) Anfangsimpedanz $Z_A = 1 \Omega$

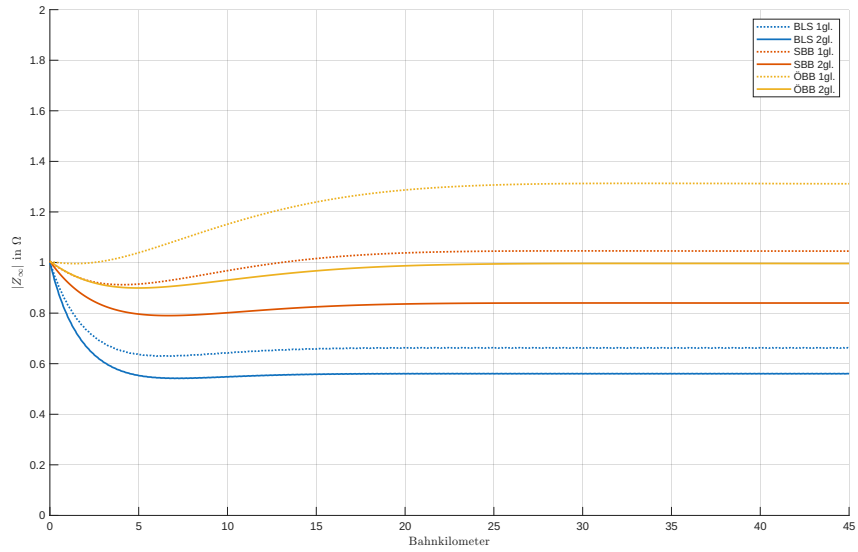


(b) Anfangsimpedanz $Z_A = 1 \Omega$

Abbildung A.1.2: Vergleich der Kettenleiterimpedanzen bei $\varrho = 100 \Omega \text{ m}$ für unterschiedliche Anfangsimpedanzen des Unterwerks

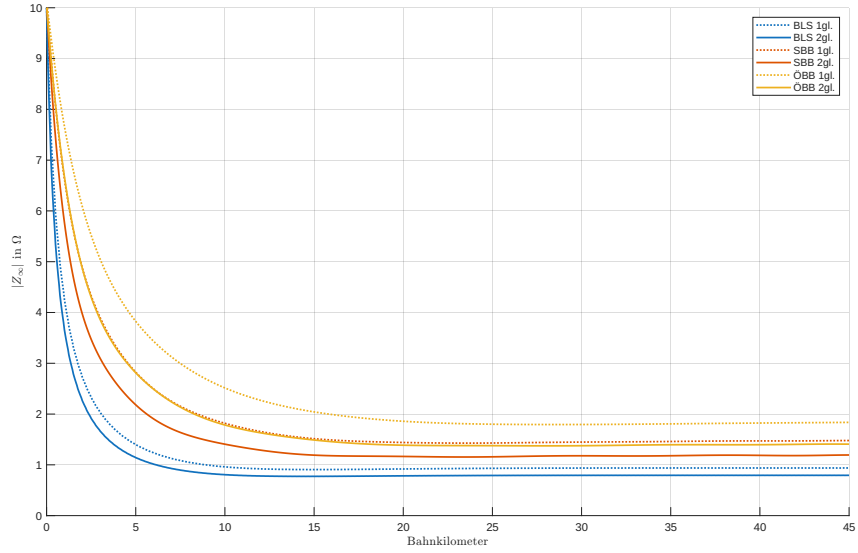


(a) Anfangsimpedanz $Z_A = 5 \Omega$

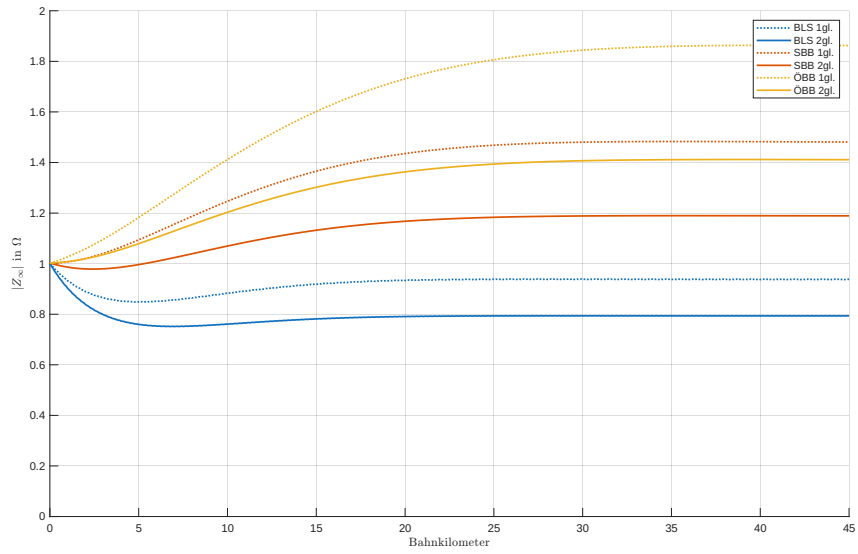


(b) Anfangsimpedanz $Z_A = 1 \Omega$

Abbildung A.1.3: Vergleich der Kettenleiterimpedanzen bei $\varrho = 500 \Omega \text{ m}$ für unterschiedliche Anfangsimpedanzen des Unterwerks



(a) Anfangsimpedanz $Z_A = 10 \Omega$



(b) Anfangsimpedanz $Z_A = 1 \Omega$

Abbildung A.1.4: Vergleich der Kettenleiterimpedanzen bei $\varrho = 1\,000 \Omega \text{ m}$ für unterschiedliche Anfangsimpedanzen des Unterwerks

A.2. Rückstromführung

A.2.1. Schienen-Querverbindungen

A.2.1.1. System BLS

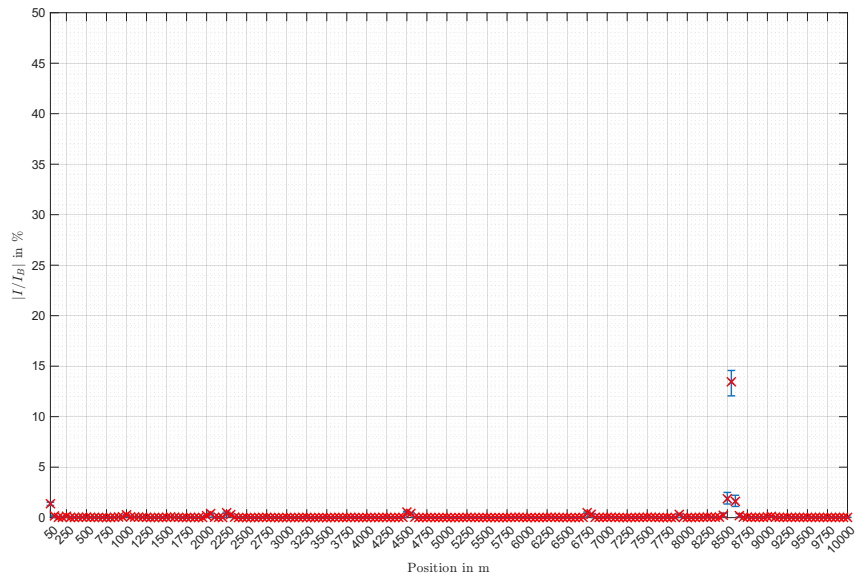


Abbildung A.2.5: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen - System: BLS

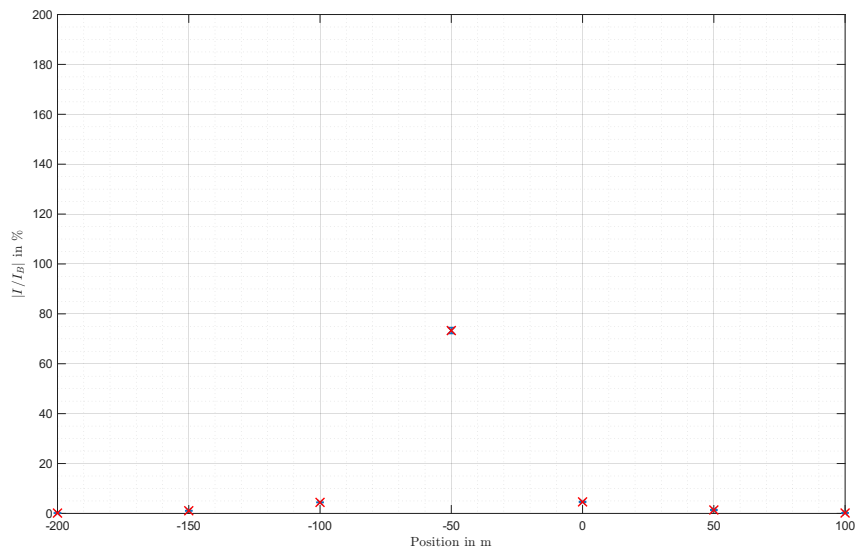


Abbildung A.2.6: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen, im Bereich des UWs - System: BLS

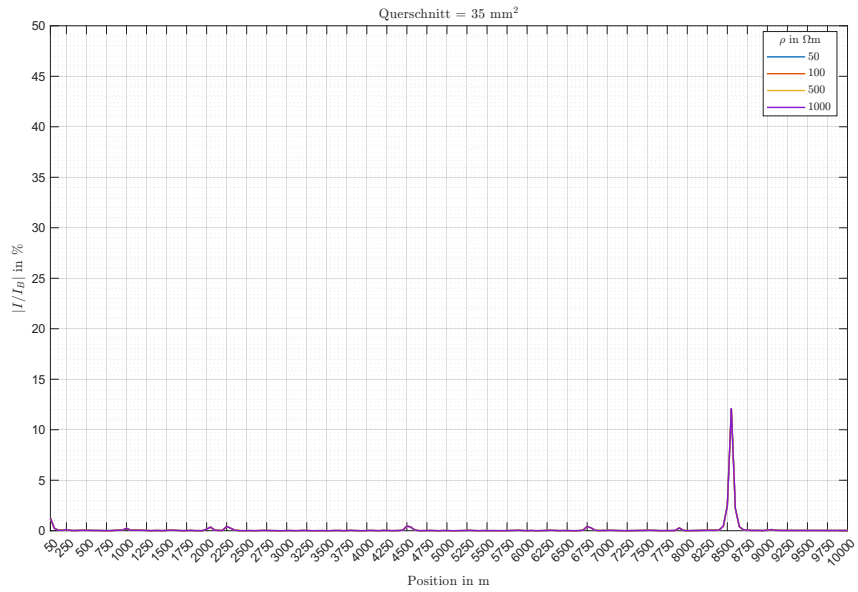


Abbildung A.2.7: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS

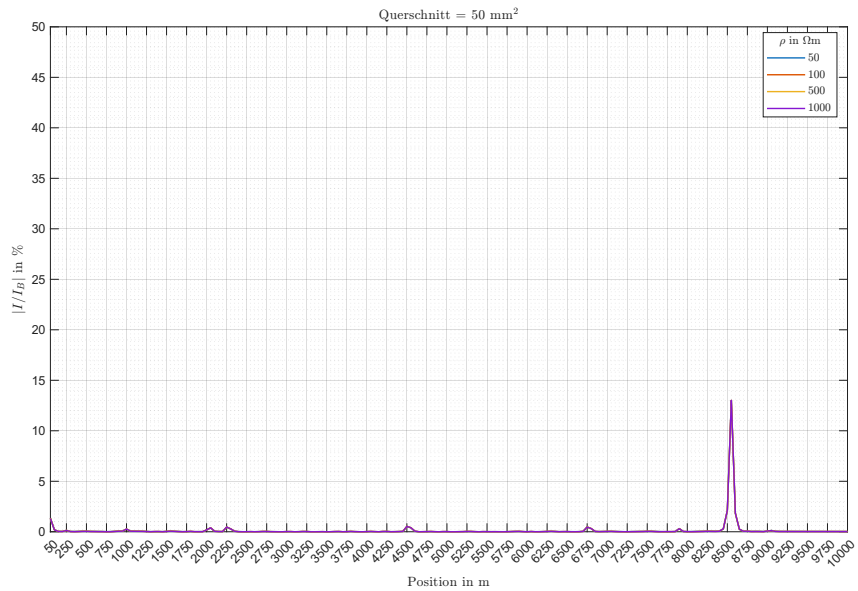


Abbildung A.2.8: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS

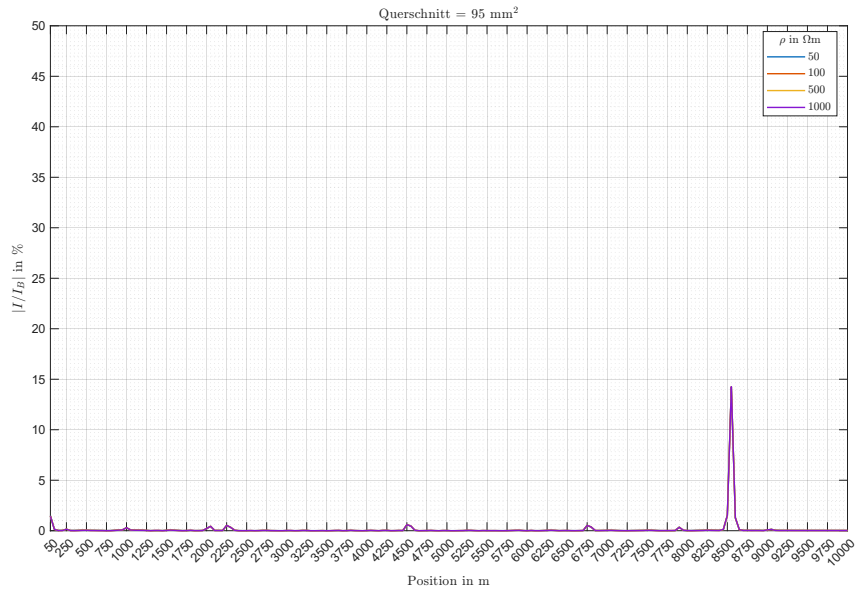


Abbildung A.2.9: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS

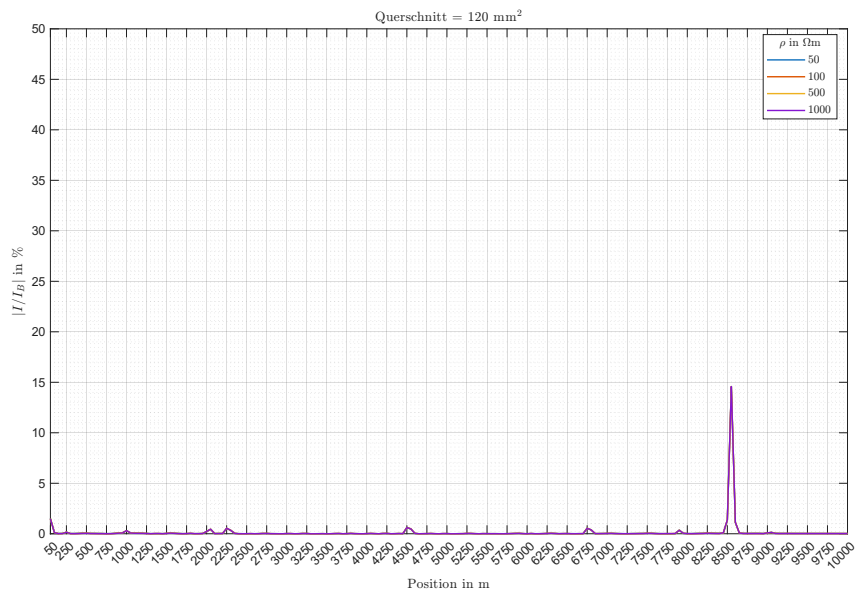


Abbildung A.2.10: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen und Mastanbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS

A.2.1.2. System SBB

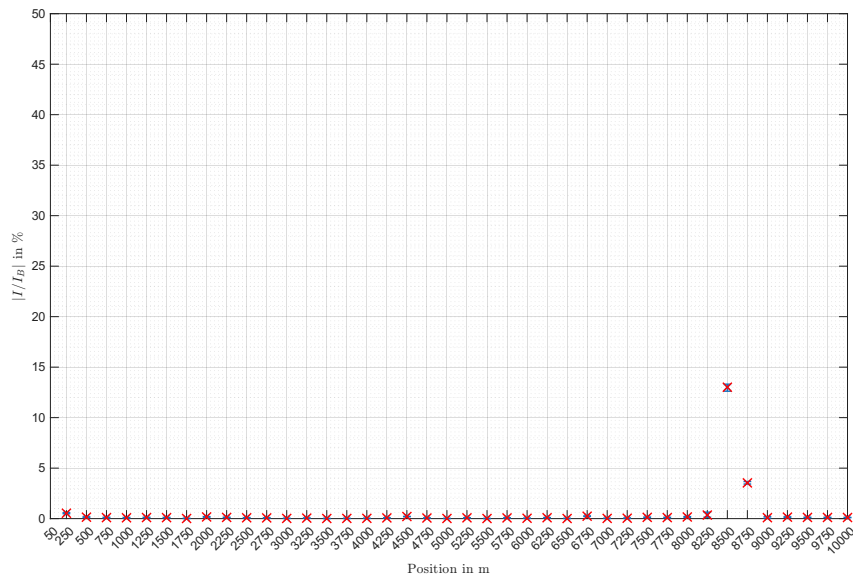


Abbildung A.2.11: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen - System: SBB

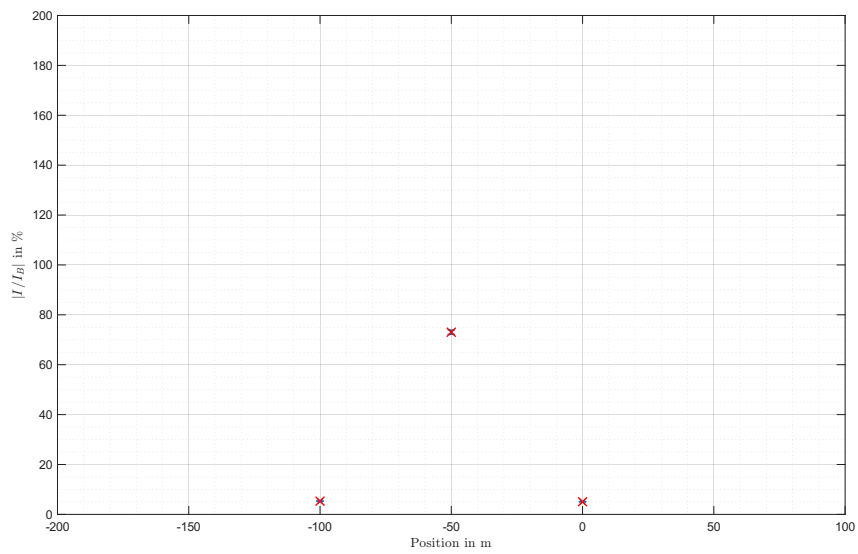


Abbildung A.2.12: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, im Bereich des UWs - System: SBB

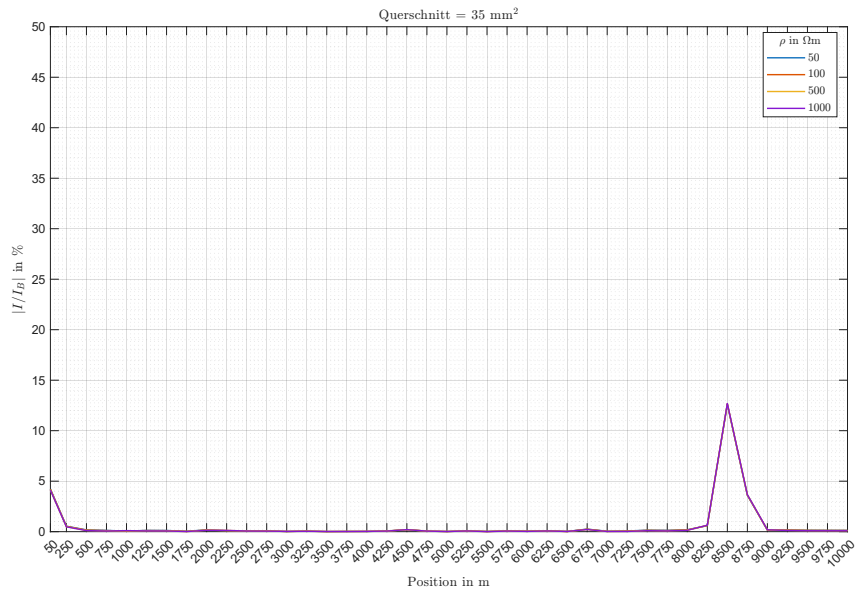


Abbildung A.2.13: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB

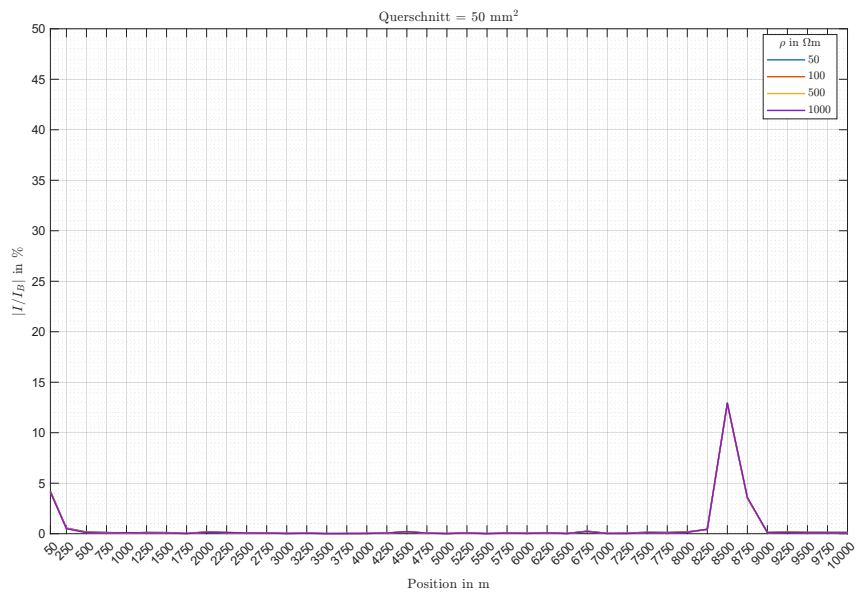


Abbildung A.2.14: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB

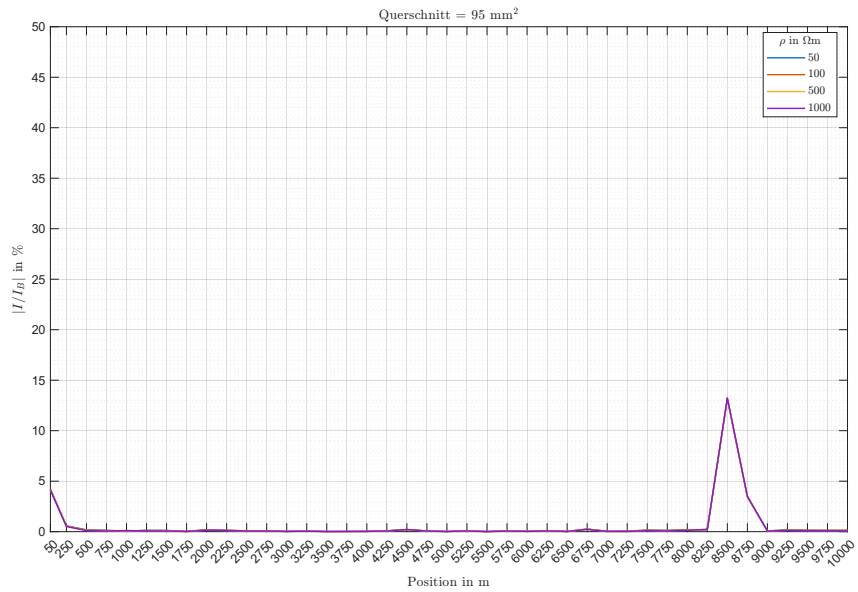


Abbildung A.2.15: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB

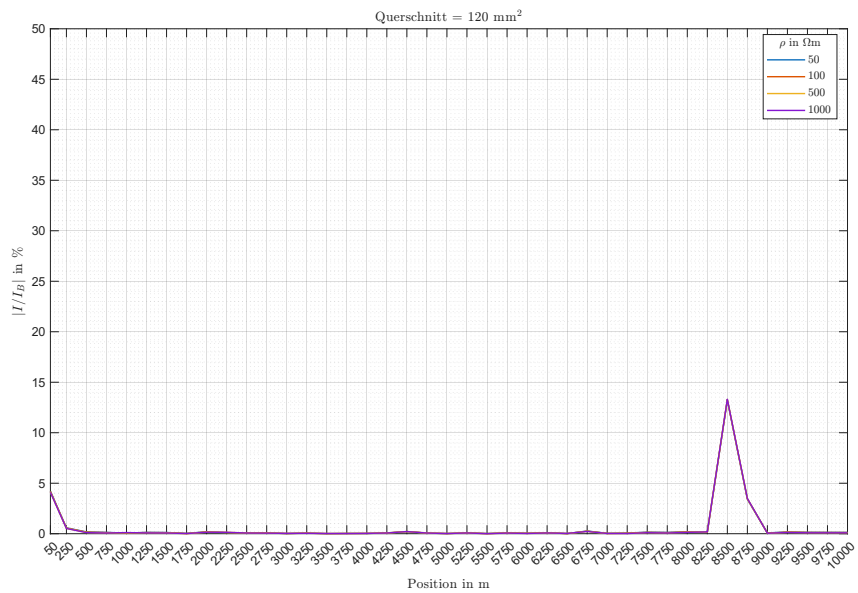


Abbildung A.2.16: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB

A.2.1.3. System ÖBB

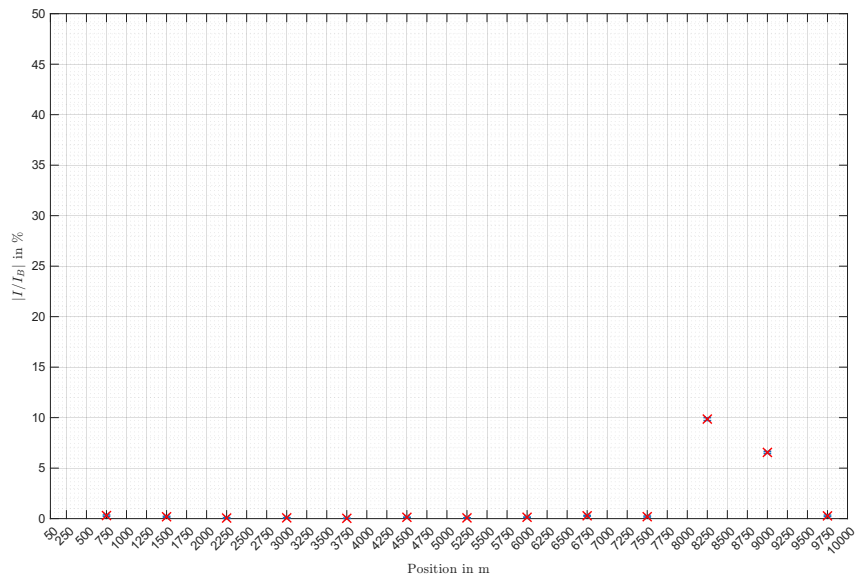


Abbildung A.2.17: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen - System: ÖBB

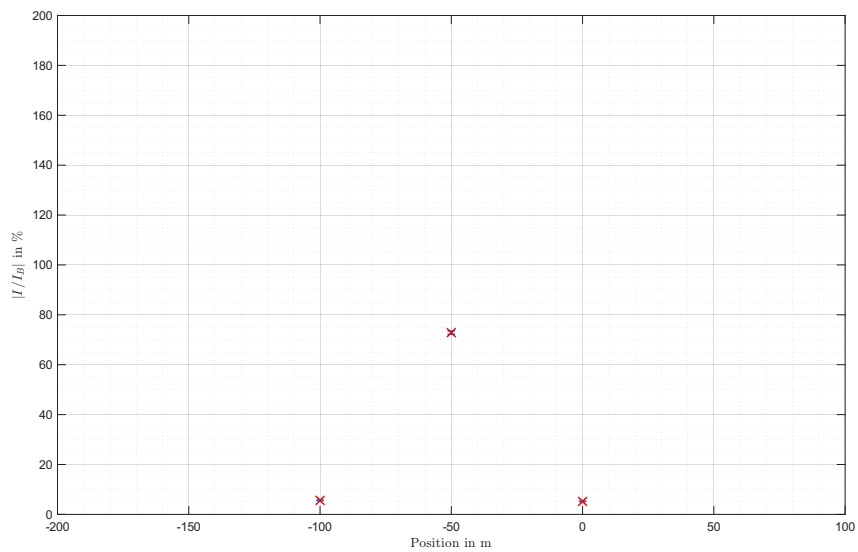


Abbildung A.2.18: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, im Bereich des UWs - System: ÖBB

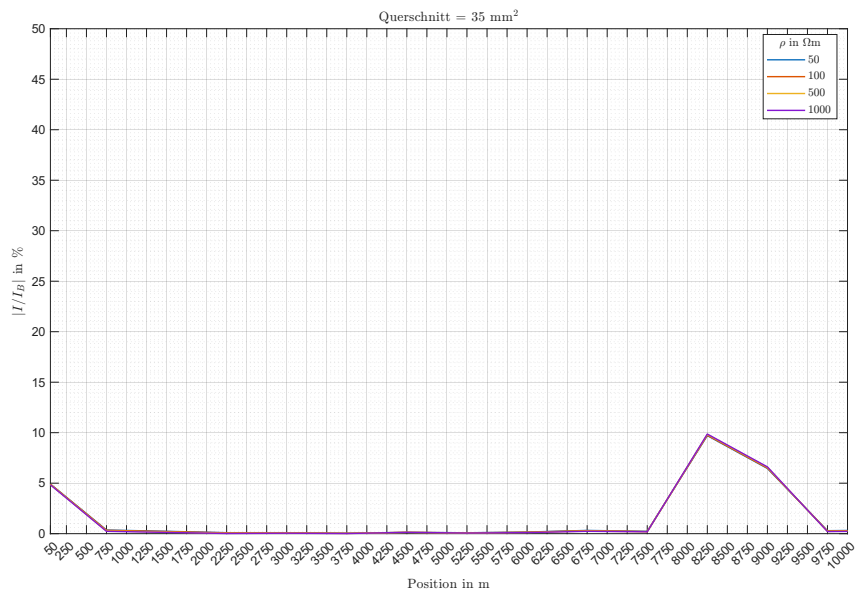


Abbildung A.2.19: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEBB

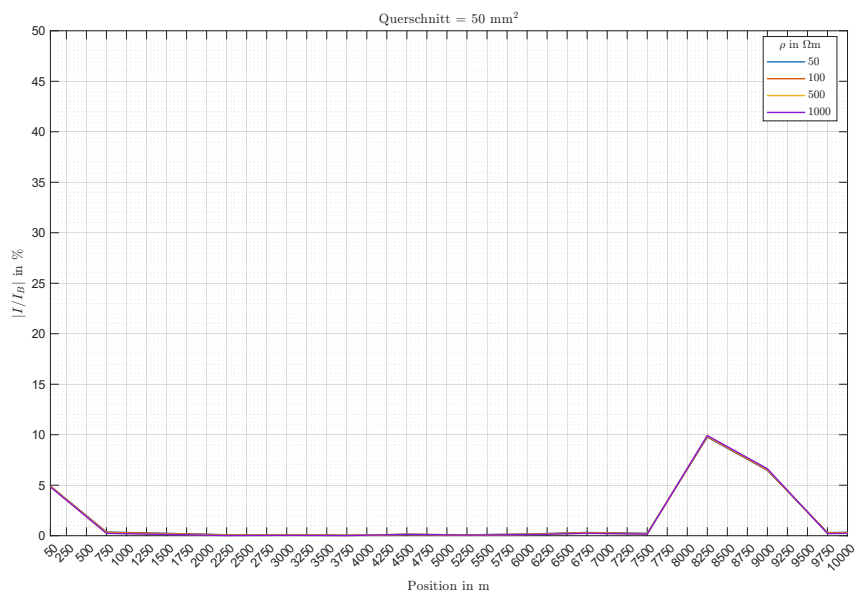


Abbildung A.2.20: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEBB

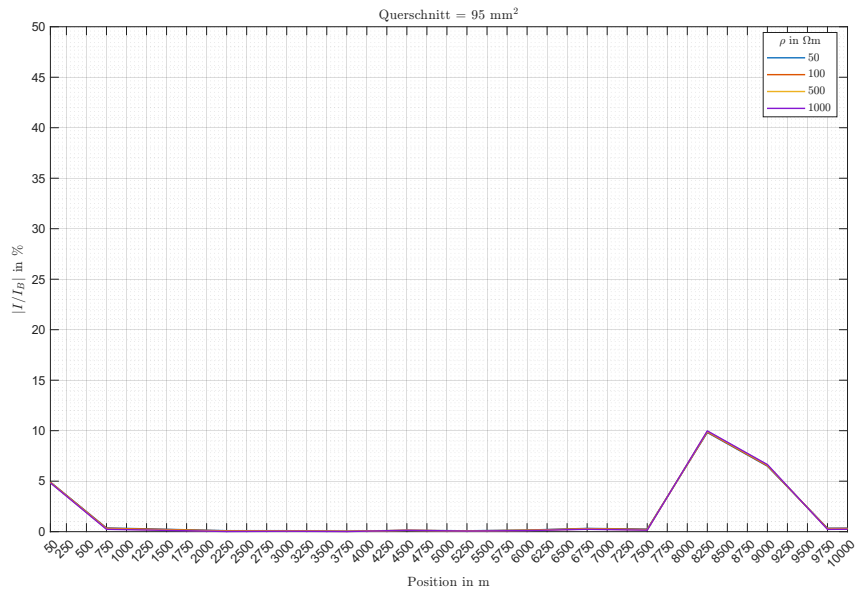


Abbildung A.2.21: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEBC

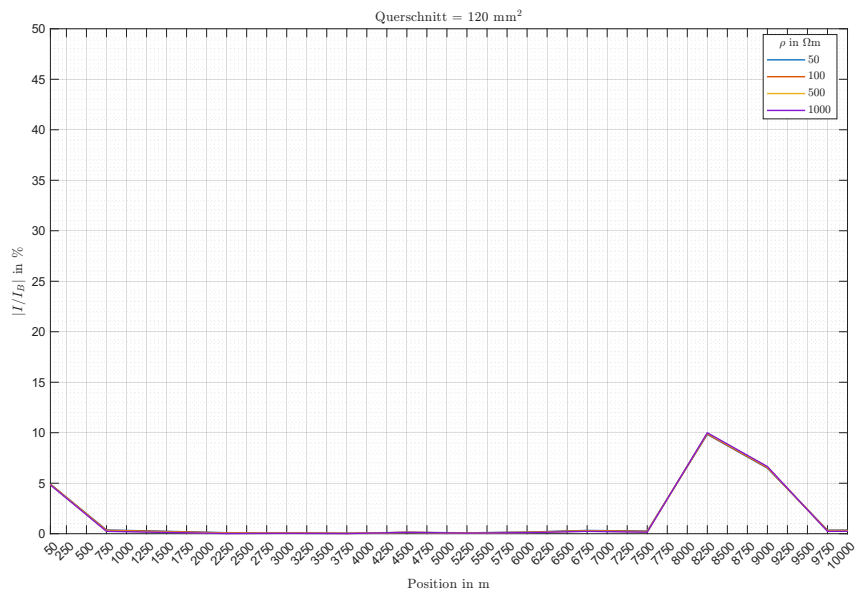


Abbildung A.2.22: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom in den Schienen-Querverbindungen, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEBC

A.2.2. Stromaufteilung

A.2.2.1. System BLS

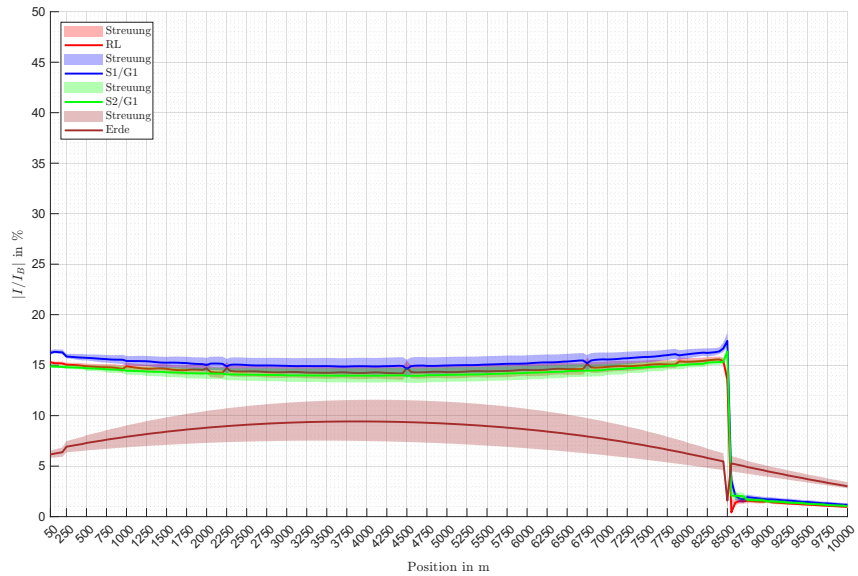


Abbildung A.2.23: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem - System: BLS

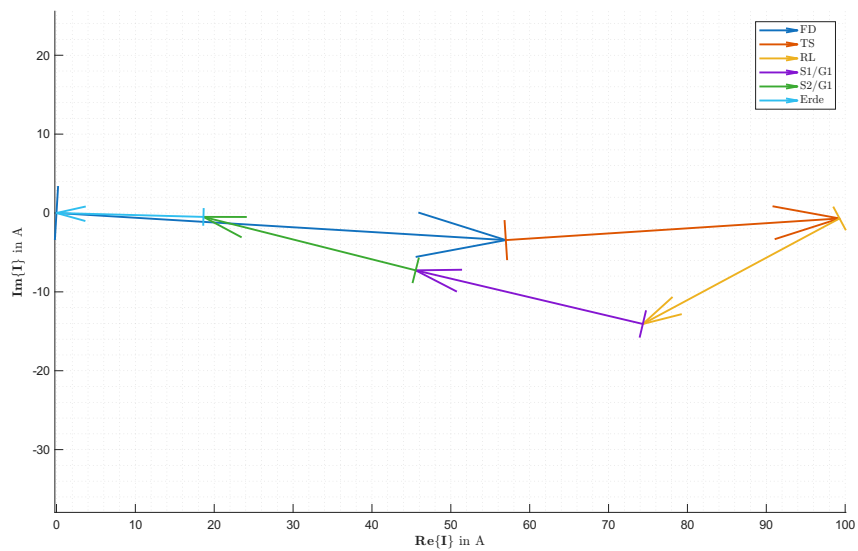


Abbildung A.2.24: Zeigerdiagramm: Stromaufteilung bei 3400m - System: BLS

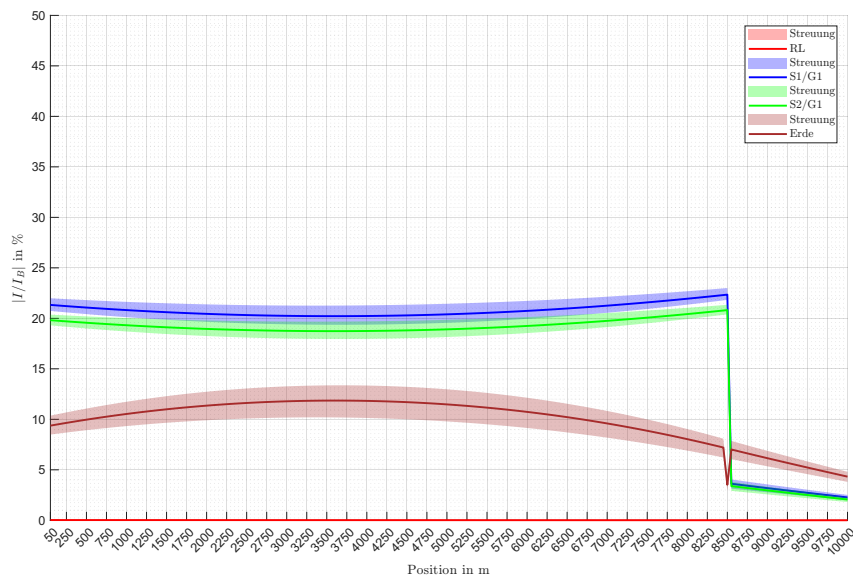


Abbildung A.2.25: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem ohne Schienen-Querverbindungen - System: BLS

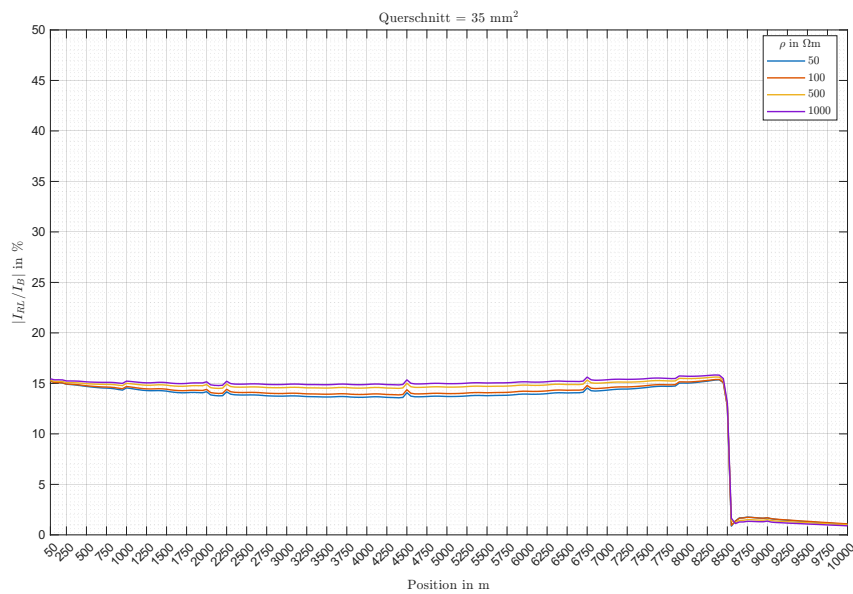


Abbildung A.2.26: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS

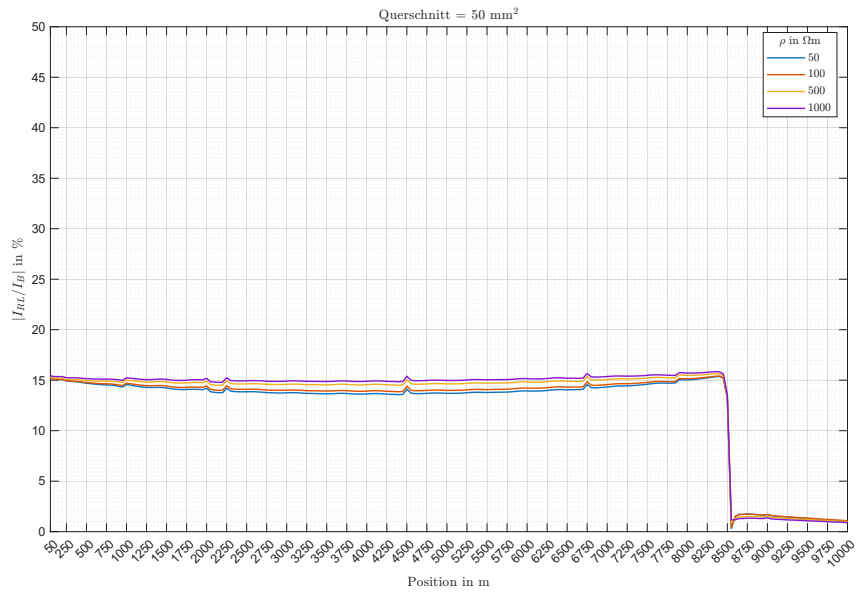


Abbildung A.2.27: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS

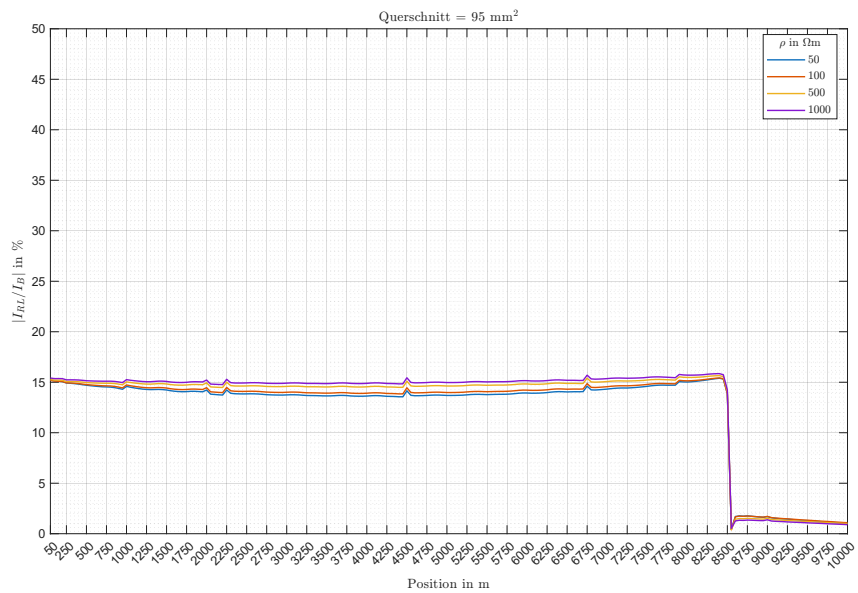


Abbildung A.2.28: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS

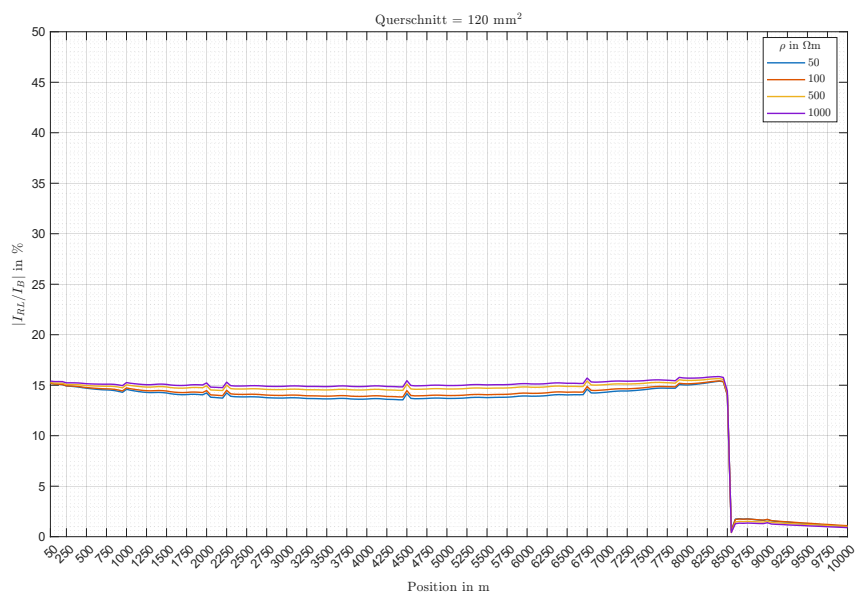


Abbildung A.2.29: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: BLS

A.2.2.2. System SBB

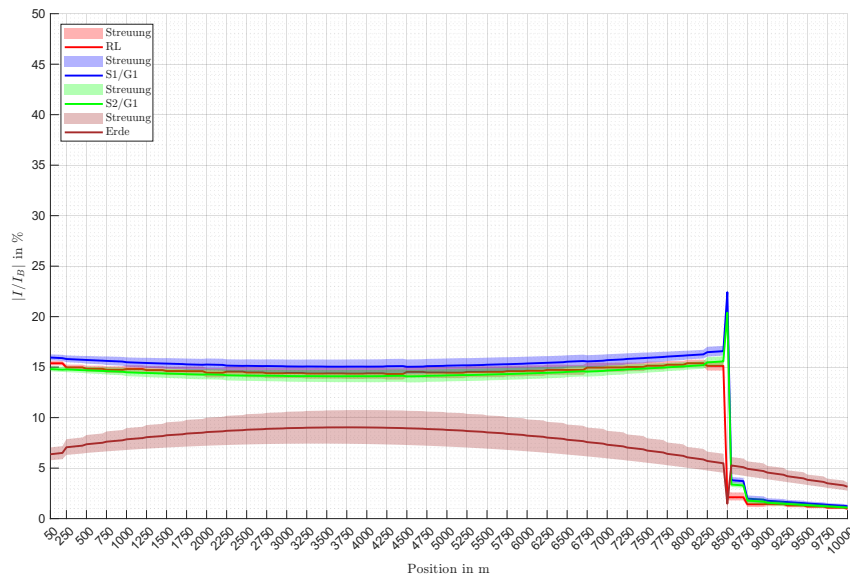


Abbildung A.2.30: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem - System: SBB

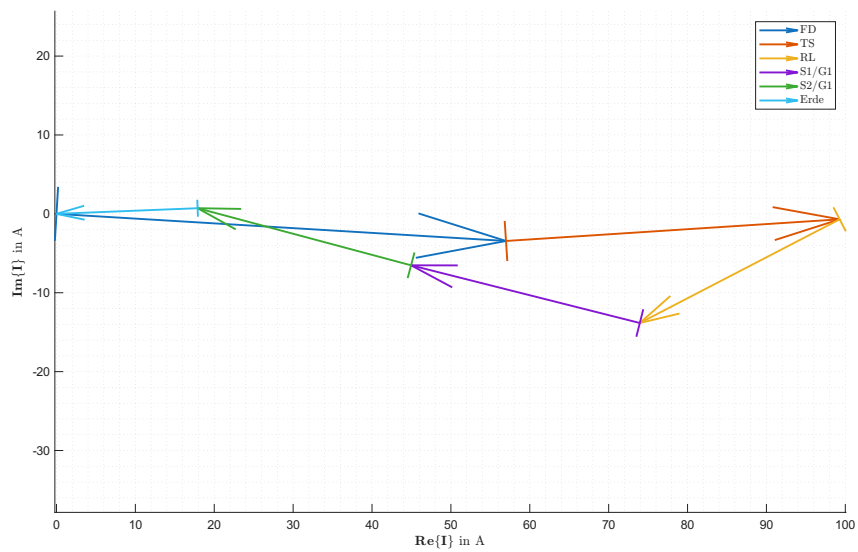


Abbildung A.2.31: Zeigerdiagramm: Stromaufteilung bei 3400m - System: SBB

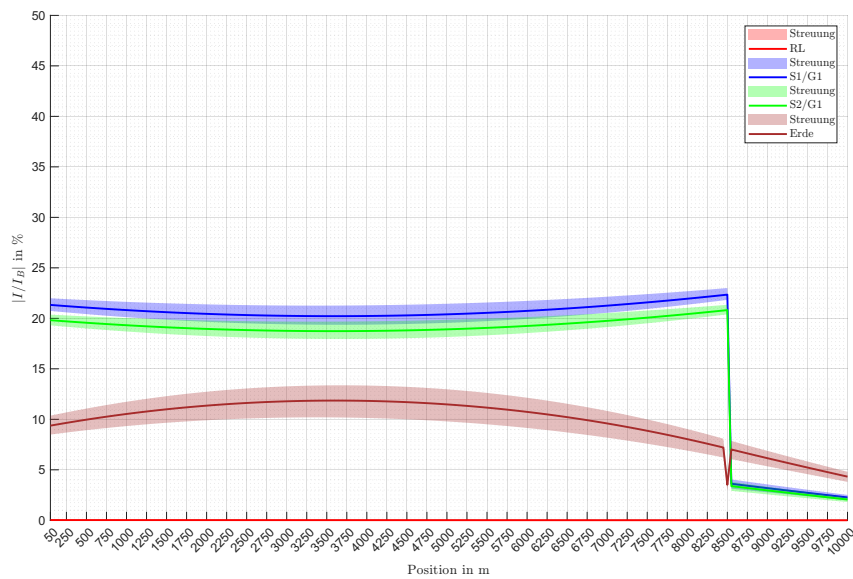


Abbildung A.2.32: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem ohne Schienen-Querverbindungen - System: SBB

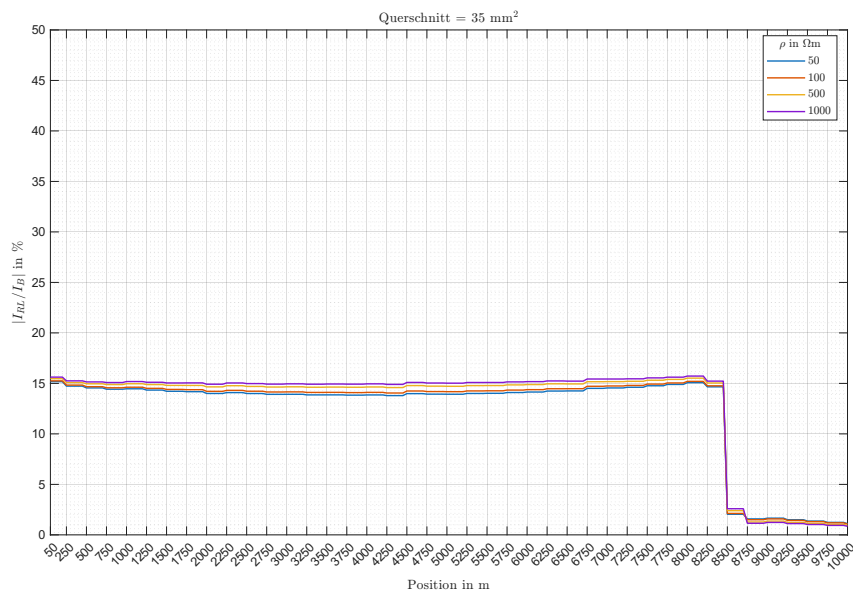


Abbildung A.2.33: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB

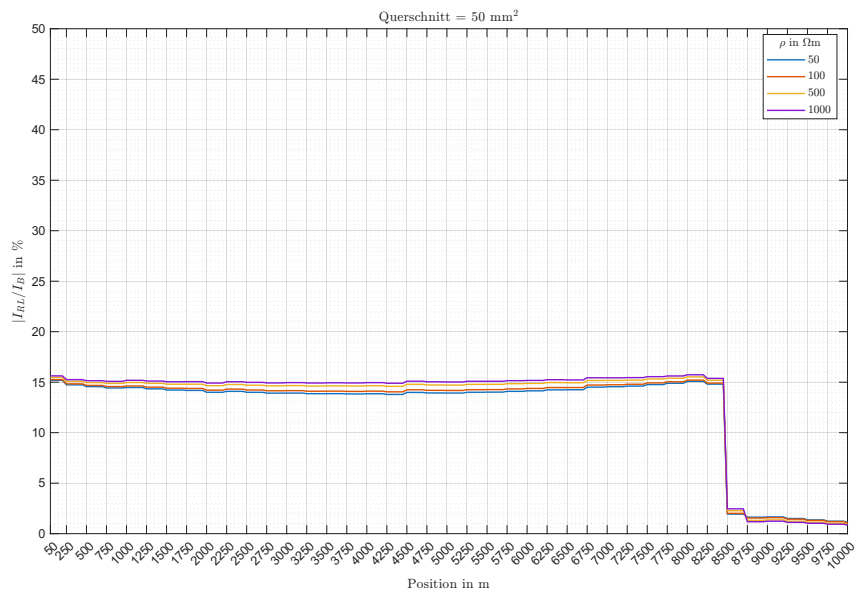


Abbildung A.2.34: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB

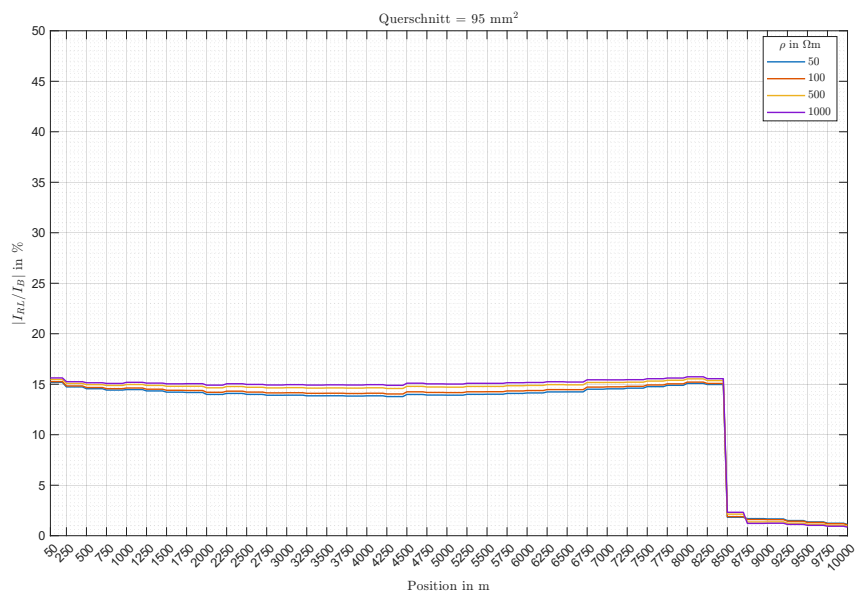


Abbildung A.2.35: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB

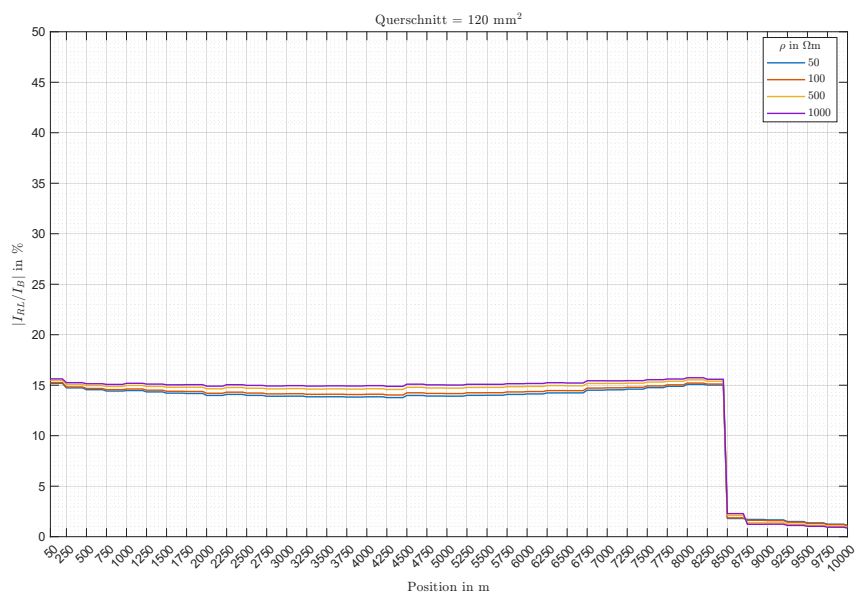


Abbildung A.2.36: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: SBB

A.2.2.3. System ÖBB

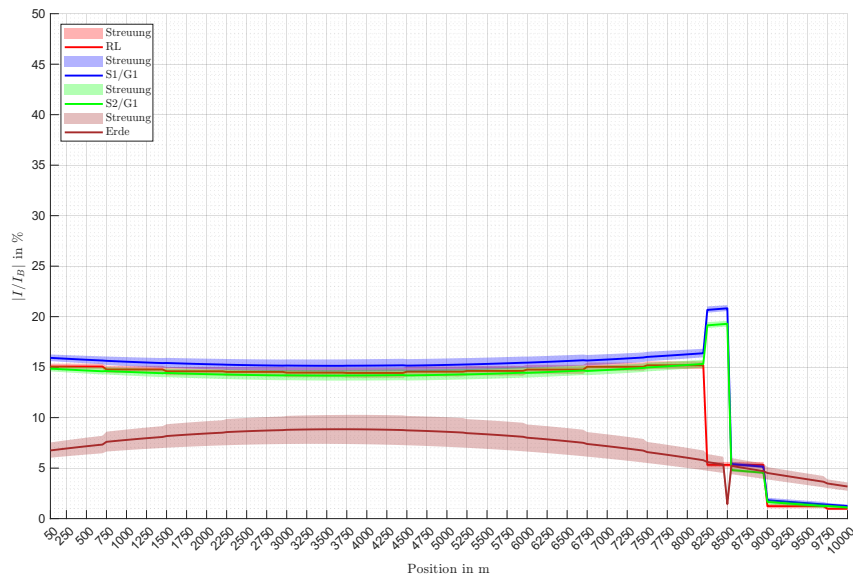


Abbildung A.2.37: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem - System: ÖBB

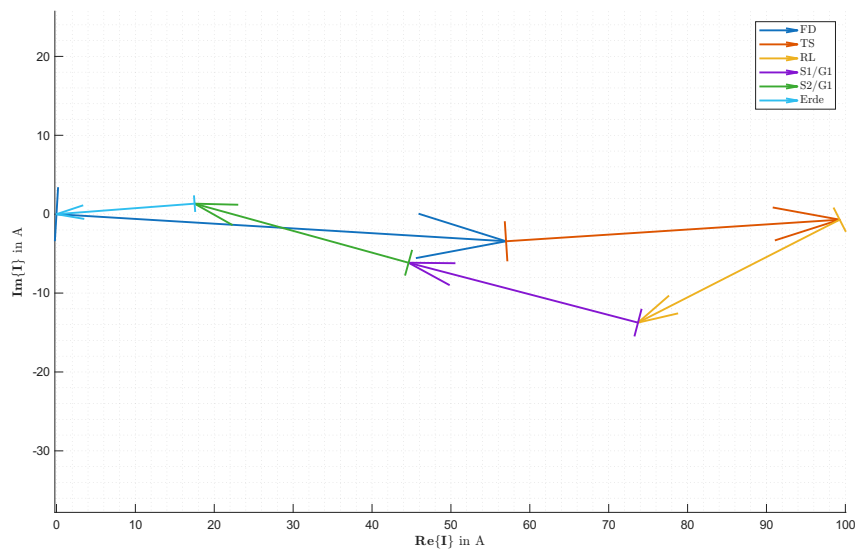


Abbildung A.2.38: Zeigerdiagramm: Stromaufteilung bei 3400m - System: ÖBB

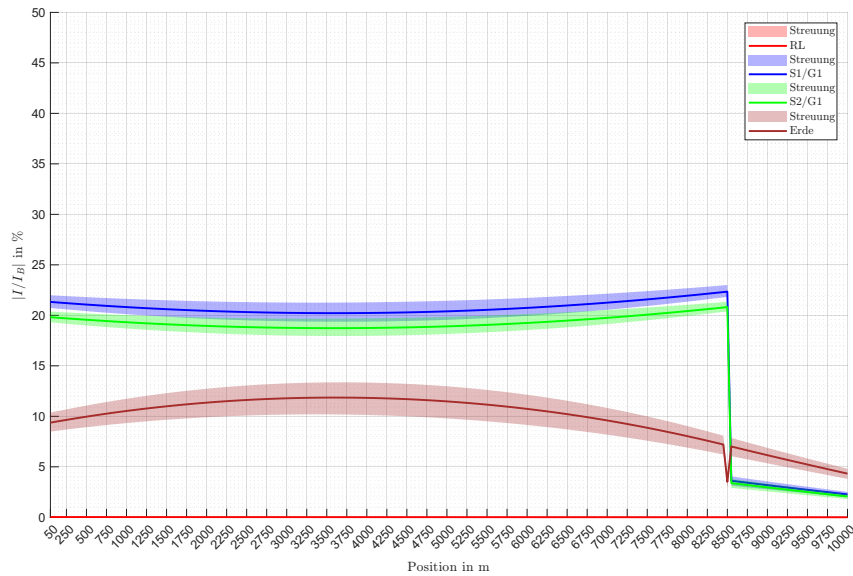


Abbildung A.2.39: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückstromführungssystem ohne Schienen-Querverbindungen - System: OEBS

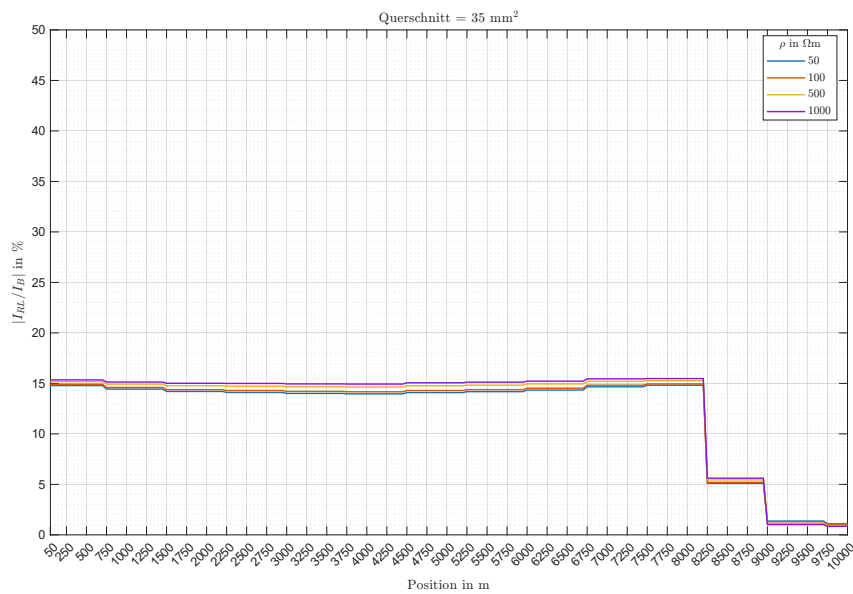


Abbildung A.2.40: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEBS

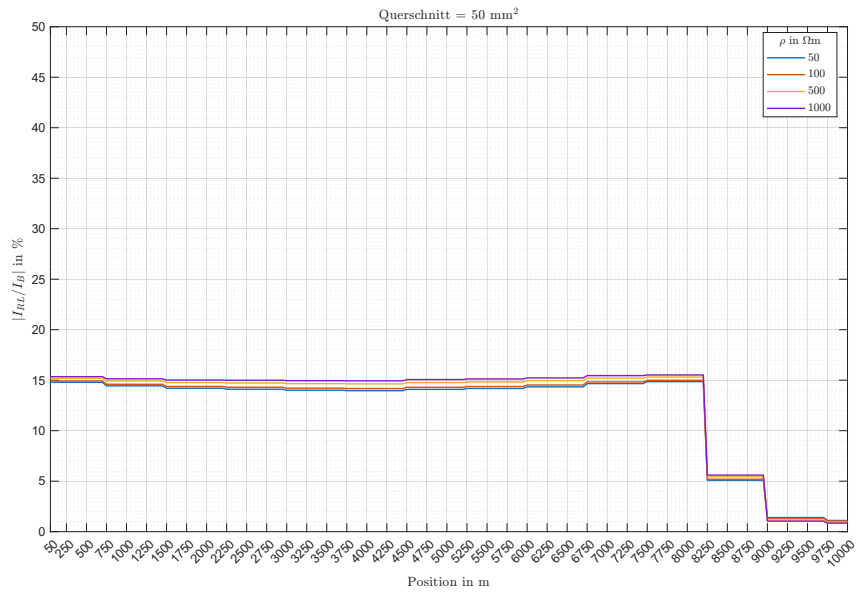


Abbildung A.2.41: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEBB

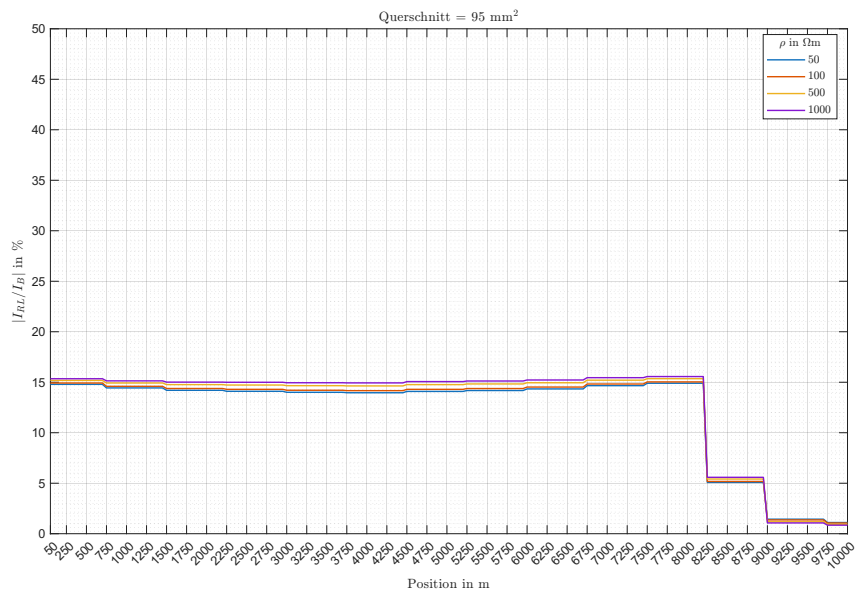


Abbildung A.2.42: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEBB

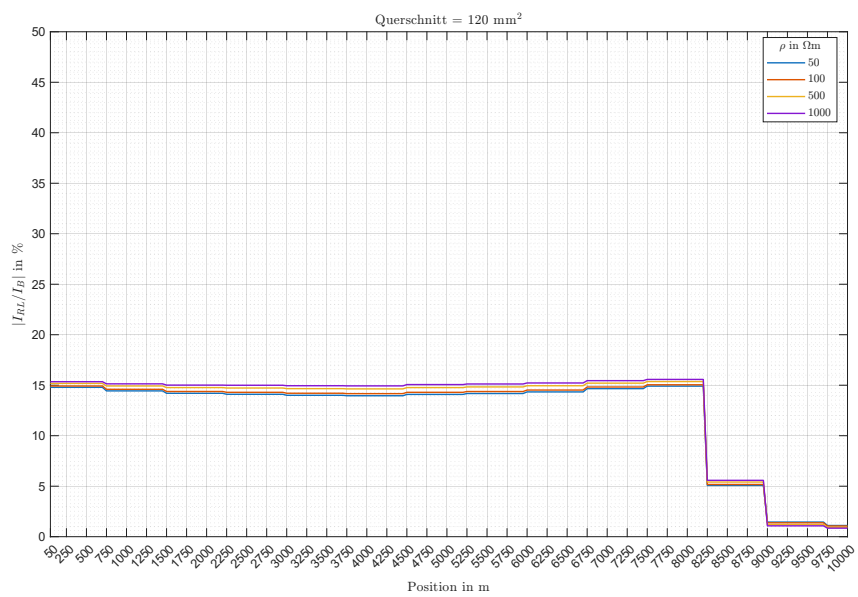


Abbildung A.2.43: Strombelastung bezogen auf den Betriebsstrom im Rückleiter, in Abhängigkeit des Querschnitts, Vergleich spezifischer Bodenwiderstand - System: OEBB

A.3. Schienenpotential

A.3.0.1. System BLS

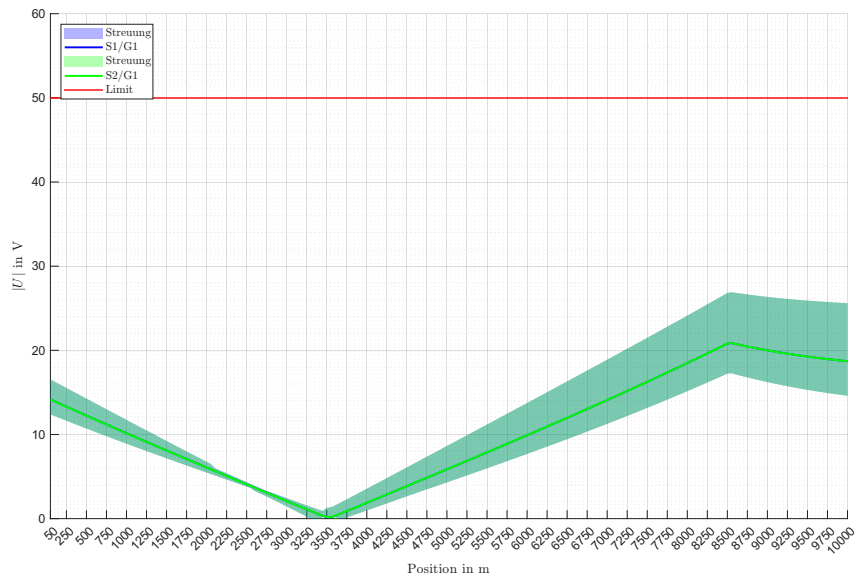


Abbildung A.3.44: Schienenpotential ohne Schienen-Querverbindungen und ohne Mastanbindung - System: BLS

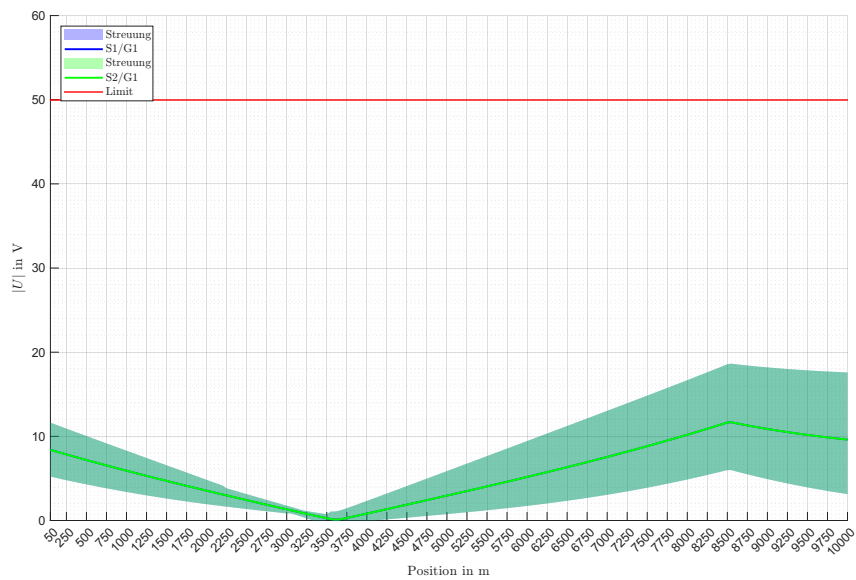


Abbildung A.3.45: Schienenpotential - System: BLS

A.3.0.2. System SBB

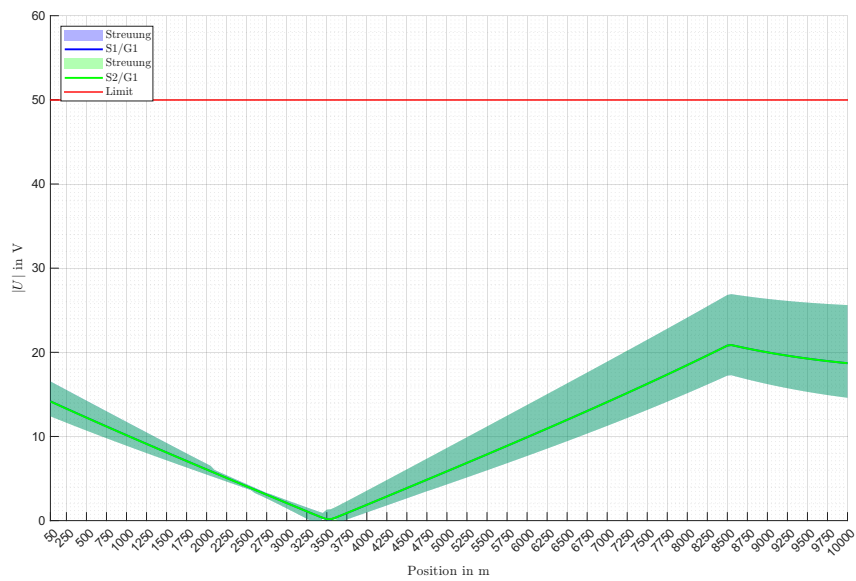


Abbildung A.3.46: Schienenpotential ohne Schienen-Querverbindungen - System: SBB

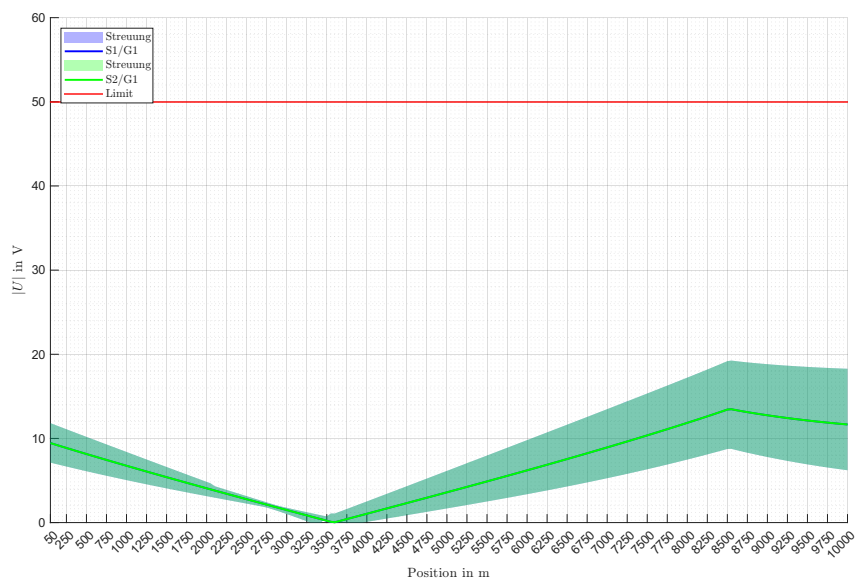


Abbildung A.3.47: Schienenpotential - System: SBB

A.3.0.3. System ÖBB

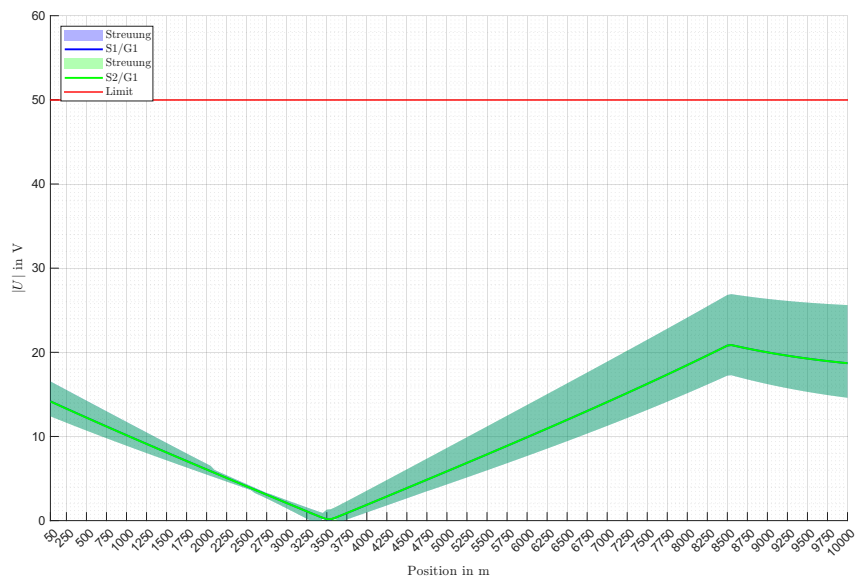


Abbildung A.3.48: Schienenpotential ohne Schienen-Querverbindungen - System: ÖBB

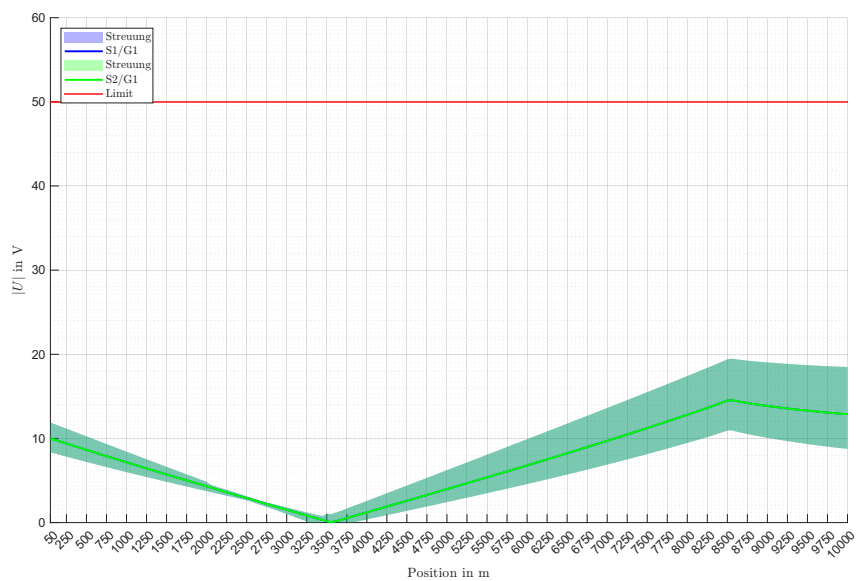


Abbildung A.3.49: Schienenpotential - System: ÖBB

A.4. Vergleich unterschiedliche Positionen, System BLS

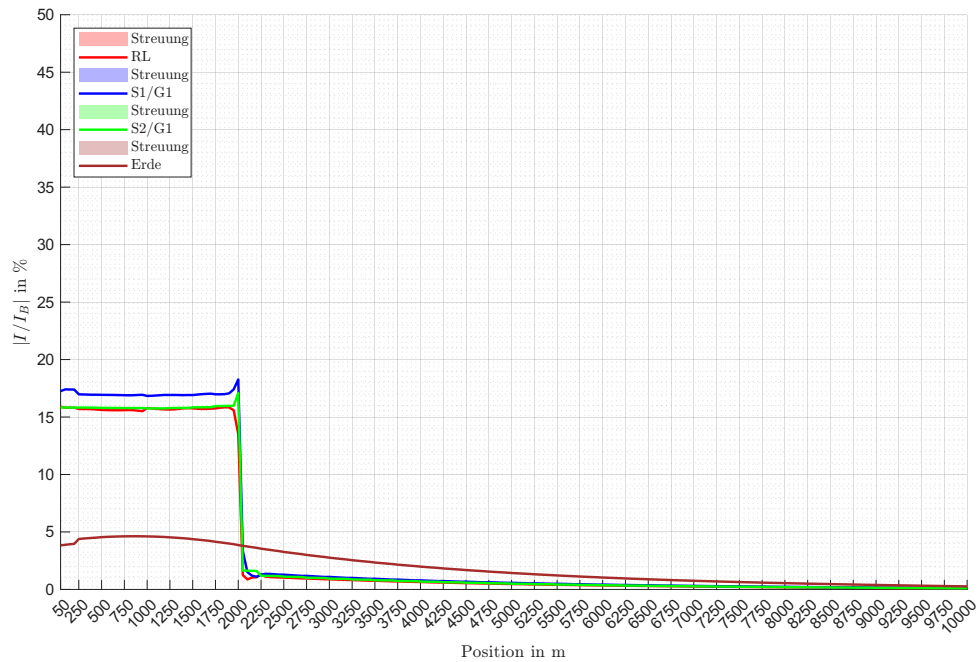


Abbildung A.4.50: Stromaufteilung im Verhältnis zum Betriebsstrom entlang der Strecke, Position des Triebfahrzeuges bei 2050 m

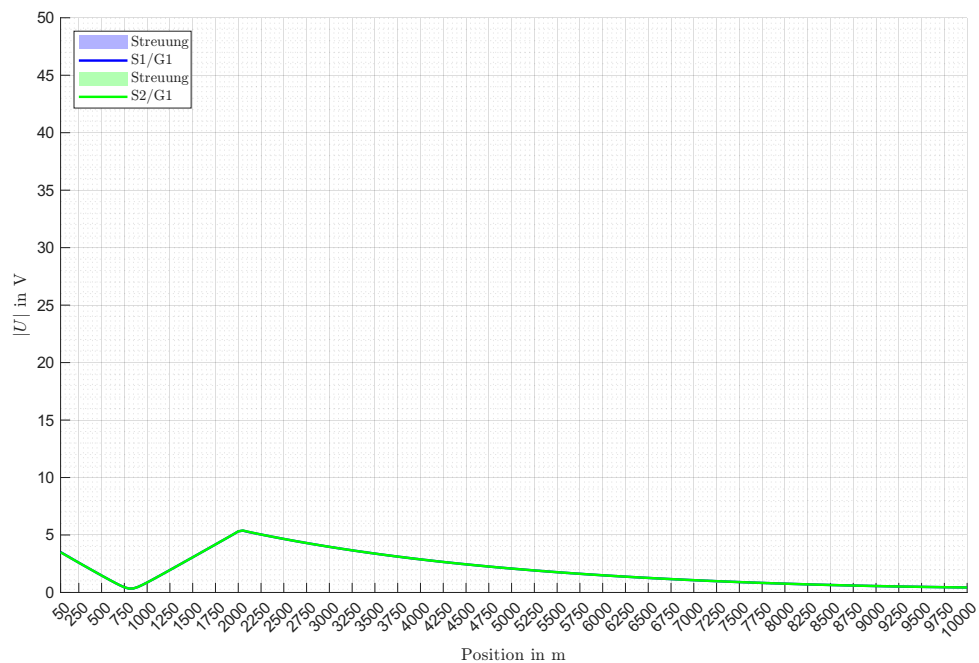


Abbildung A.4.51: Schienenpotentiale, Position des Triebfahrzeuges bei 2050 m

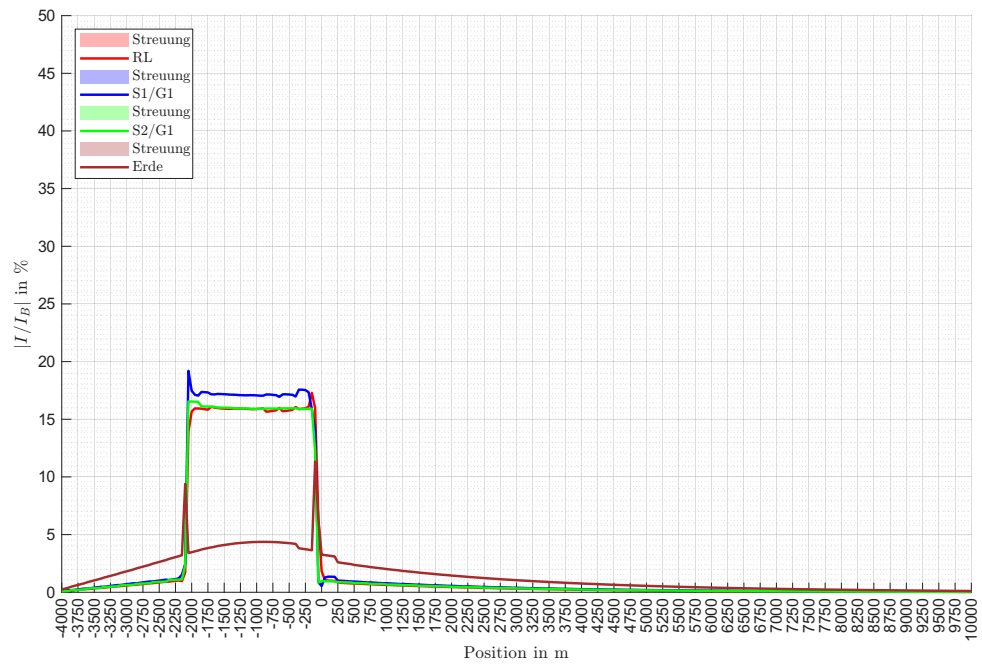


Abbildung A.4.52: Stromaufteilung im Verhältnis zum Betriebsstrom entlang der Strecke, Position des Triebfahrzeuges bei -2050 m

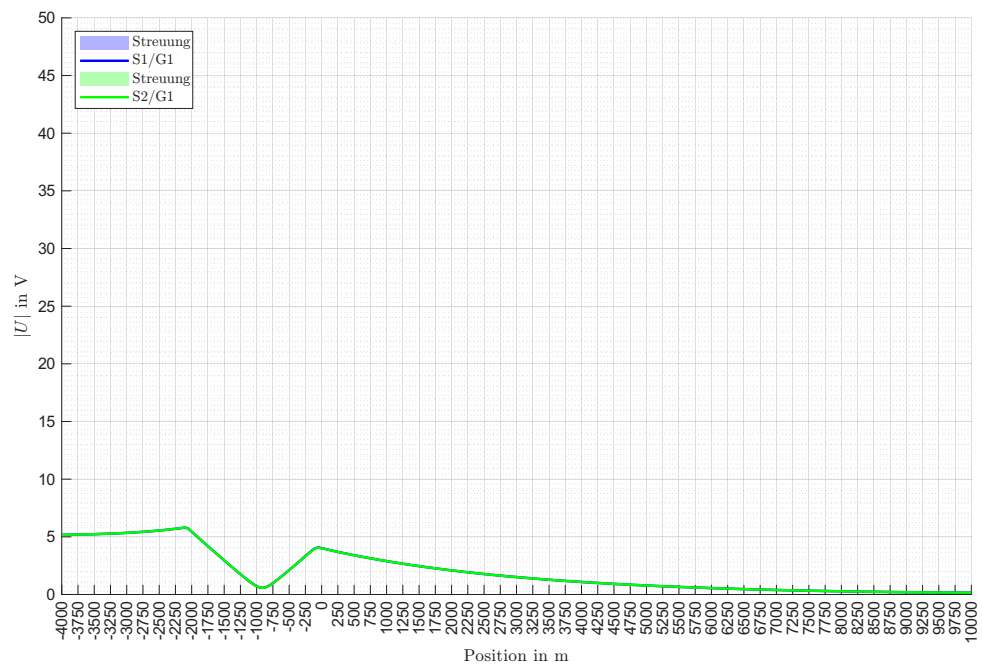


Abbildung A.4.53: Schienenpotentiale, Position des Triebfahrzeuges bei -2050 m

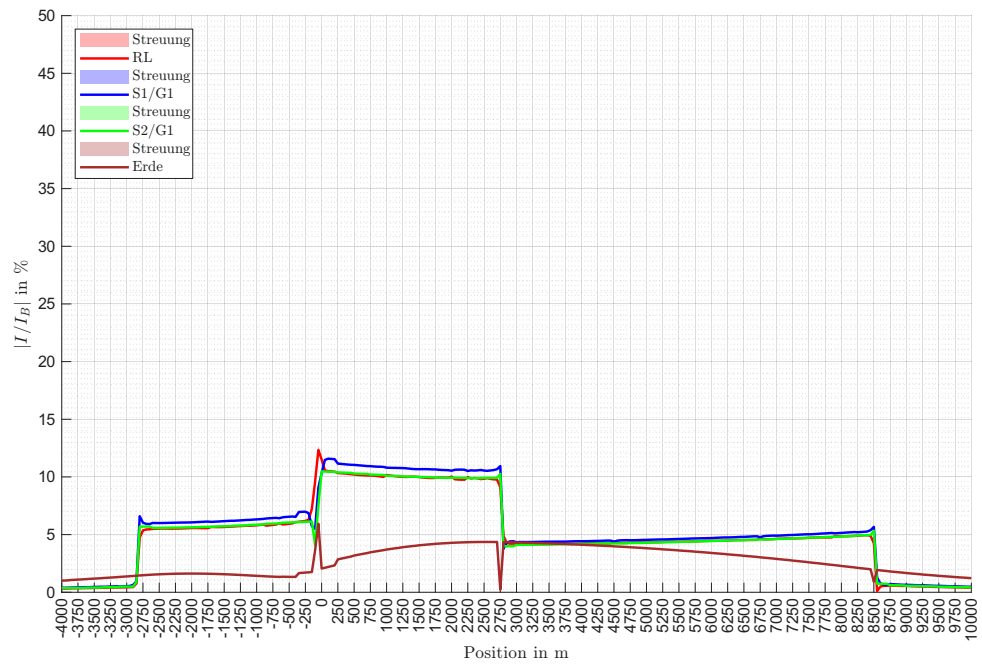


Abbildung A.4.54: Stromaufteilung im Verhältnis zum Betriebsstrom entlang der Strecke, Positionen der Triebfahrzeuge bei ± 2050 m, 8550 m

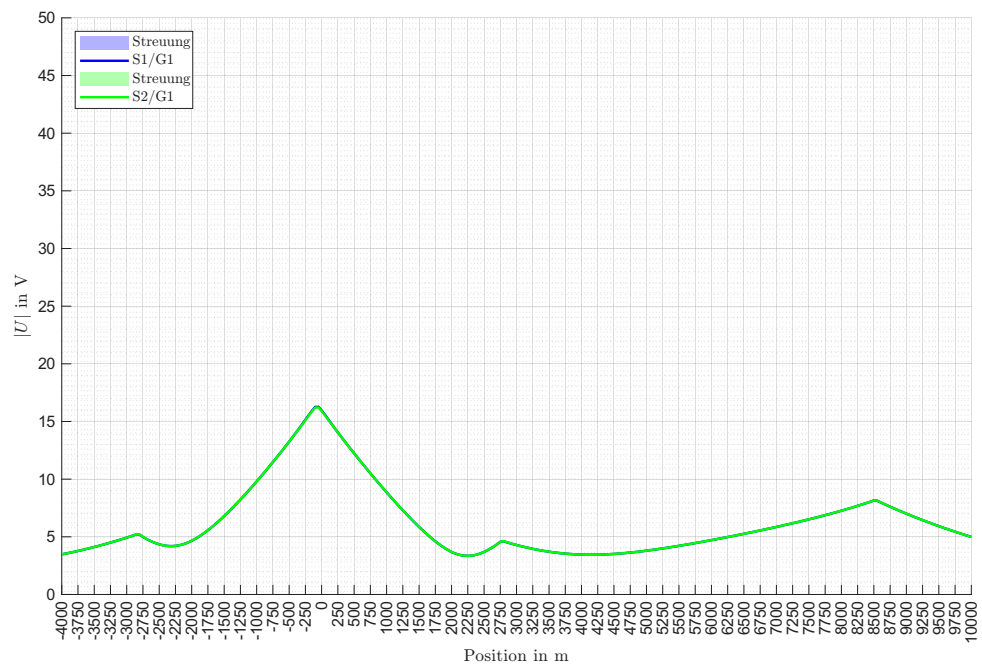


Abbildung A.4.55: Schienenpotentiale, Positionen der Triebfahrzeuge bei ± 2050 m, 8550 m

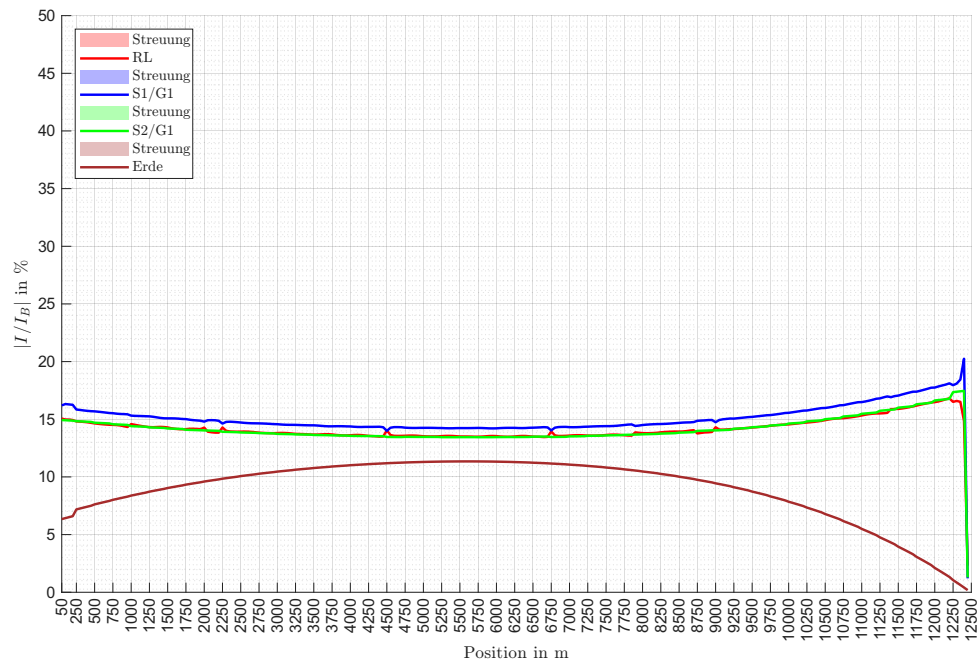


Abbildung A.4.56: Stromaufteilung im Verhältnis zum Betriebsstrom entlang der Strecke, Position des Triebfahrzeuges bei 12 450 m

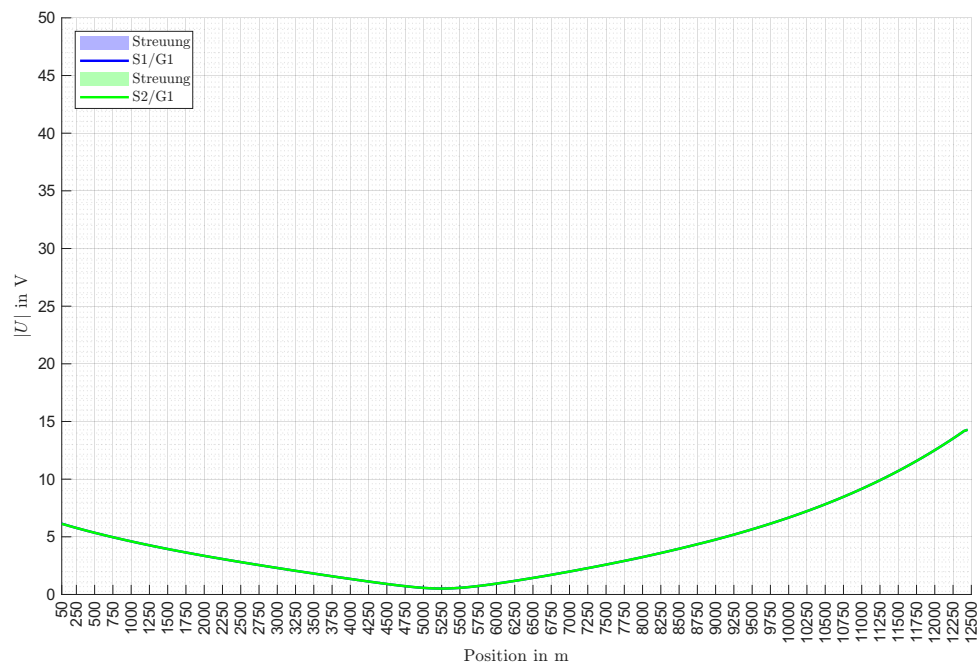


Abbildung A.4.57: Schienenpotentiale, Position des Triebfahrzeuges bei 12 450 m

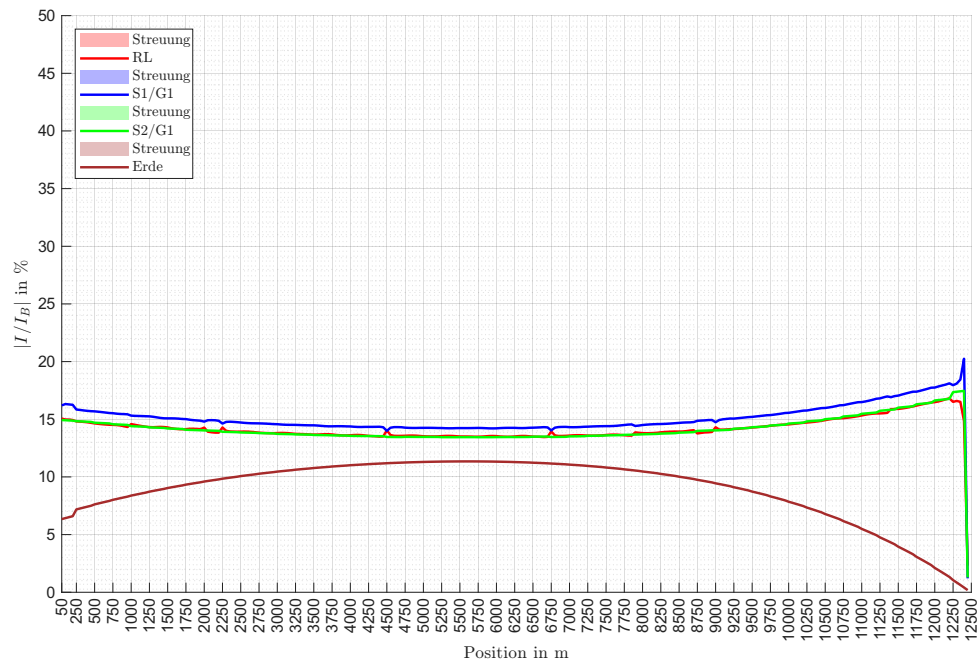


Abbildung A.4.58: Stromaufteilung im Verhältnis zum Betriebsstrom entlang der Strecke, Position des Triebfahrzeuges bei 12 450 m, mit Kettenleiterimpedanz

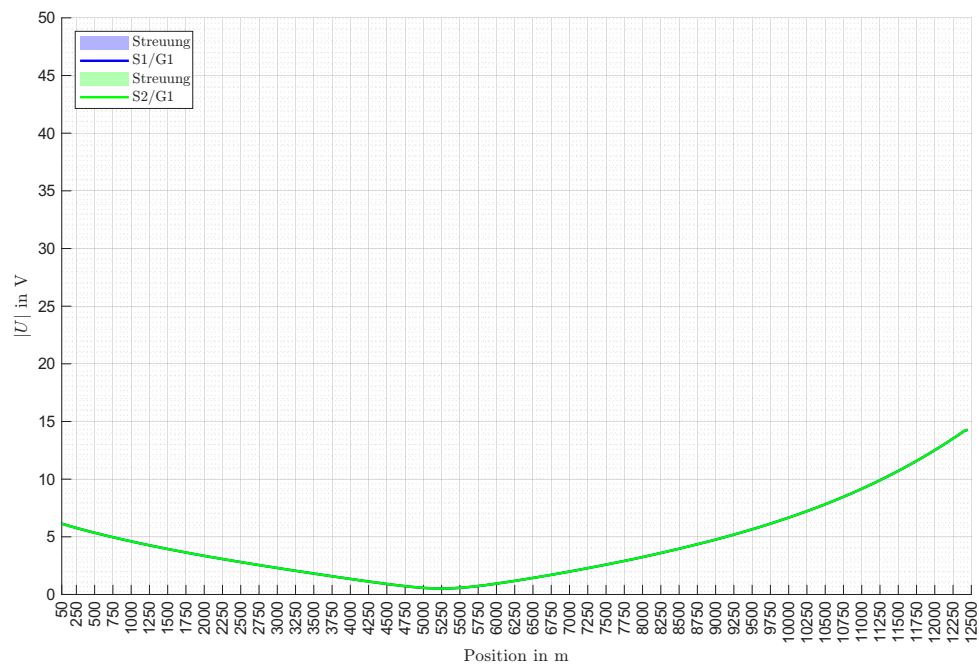


Abbildung A.4.59: Schienenpotentiale, Position des Triebfahrzeuges bei 12 450 m, mit Kettenleiterimpedanz



Markus Kaiser, Graz

TU Graz
Institut für Elektrische Anlagen und Netze
Inffeldgasse 18/I
8010 Graz
Austria
+43 316 873 7551
www.iean.tugraz.at



ELEKTRISCHE
ANLAGEN & NETZE
TU GRAZ