



**SIGNON**

EIN UNTERNEHMEN DER DB NETZ AG

# Wirkungsbereiche von Erdungseinrichtungen am Beispiel 4-gleisiger Strecken (Unterinntal)



Prof. Gerhard HOFMANN, Signon Deutschland/HTW Dresden

# Gliederung

---

1 Einleitung

2 Modell Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

3 Untersuchungsergebnisse

4 Untersuchungen zum Terfener Tunnel

5 Zusammenfassung

# 1 Einleitung

## Einleitung

Für das mit AC 15 kV 16,7 Hz elektrifizierte Eisenbahnsystem der ÖBB waren einige Fragen der Behandlung von Erdungseinrichtungen zu betrachten.

Es war dabei die grundsätzliche Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen zu untersuchen.



## Einleitung

---

Bei

### **Arbeiten an der Oberleitungsanlage und bei Rettungsmaßnahmen**

ist bei den ÖBB vorgeschrieben, eine Erdungsstange unmittelbar am Arbeits- oder Gefährdungspunkt zwischen Oberleitung und dem Gleis als Verbindung zur Rückleitung einzuhängen.

Bei **zweigleisigen Strecken** wird bisher ein **Wirkungsbereich der Erdungsstange von 200 m zu beiden Seiten der Erdungsstange angenommen**.

Bei Unterstellung einer **Kurzschlussstromstärke von 30 kA** in der Fahrleitung sollen bei eingelegter Erdungsstange **die zulässigen Berührungsspannungen nach EN 50122-1** nicht überschritten werden.

## Einleitung

---

Bei **Arbeiten im Gefahrenbereich der Oberleitung**, nicht jedoch an der Oberleitung selbst, wird nach den ÖBB-Vorschriften die **Maßnahme „Erden langer Abschnitte“** angewendet.

Dabei wird angenommen, dass der **zu schützende Bereich** zwischen **zwei Erdungseinrichtungen 1 600 m bei viergleisigen und 2 000 m bei zweigleisigen Strecken** betragen kann.

Der in den ÖBB-Vorschriften definierte Ansatz ist hinsichtlich **Plausibilität** zu überprüfen. Die Annahmen sind durch rechnerischer rechnerischen Nachweis zu belegen

## Einleitung

---

### Zu klärende Fragen

- **Wie groß ist der Schutzbereich** einer zu Schutzzwecken in die Oberleitung eingehängten Erdungsstange im Falle eines Kurzschlusses?
- Ist die **Größe des Schutzbereichs** mit 200 m vor und hinter der Erdungsstange **korrekt**?
- Welche **Rahmenbedingungen** können auf einer **vier-, drei- und zweigleisigen Strecke** auftreten, damit die Schutzwirkung im Wirkungsbereich ausreichend ist, d. h. Einhaltung der zulässigen Berührungsspannungen (Beispiel: 1 Gleis freigeschaltet und geerdet, 2 x max. Betriebsstromstärken je 1 080 A, Kurzschlussstromstärke 1 x 30 kA)?
- **Welche Auswirkungen hat der Gleisabstand?**

## 2 Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

# Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

---

## Verwendeter Algorithmus

Für diese Untersuchungen ist es erforderlich **Berechnungen mit Berücksichtigung der vollständigen elektromagnetischen Kopplung** durchzuführen.

Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass sowohl

- die **galvanischen Verkopplungen** über das Rückleitungssystem der Eisenbahn und die Erdrückleitung,
- die **induktiven Kopplungen** von Hinströmen in der Fahrleitung sowie Rückströmen in allen Leitern des Rückleitungssystems und
- die **kapazitive Influenz** der unter Fahrleitungsspannung befindlichen Leiter auf die geerdeten Leiter im Bereich der Schutzwirkung der Erdungsmaßnahmen berücksichtigt werden.

## Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

---

Die Realisierung erfordert die Nachbildung:

- der **Fahrleitung** mit ihren Einzelleitern Fahrdraht, Tragseil (Verstärkungsleitungen oder Speiseleitungen könnten berücksichtigt werden),
- des **Rückleitungssystems** mit den Einzelleitern Schiene, Rückleiterseil (Bänderder oder andere längsleitende Leiter mit Anschluss an die Rückleitung, Boosterseile könnten ebenfalls betrachtet werden),
- die **Quervermaschung in der Fahrleitung** zwischen Fahrdraht und Tragseil (Hänger), zwischen Fahrleitungen der Richtungsgleise,
- die **Quervermaschung im Rückleitungssystem** mit den Elementen Schienenquerverbinder und Gleisquerverbinder, Anschlüsse der Rückleiterseile, Anschlüsse der Bänderder
- der **Erdableitung der Rückleiterseile** (eigentlich Erdableitung der Fahrleitungsmasten) und die Erdableitung der Schienen
- für die Komplettierung des Modells müssen auch die **Erdübergangswiderstände der Unterwerke** berücksichtigt werden.

## Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

---

Beim verwendeten Rechenverfahren wird die elektrifizierte Eisenbahnstrecke in äquidistante Elemente (Länge ca. 50 m ... 100 m) zerlegt und alle Leiter am Beginn und am Ende jedes Streckenelementes mit einem Knotenpunkt versehen.

Jeder Leiter kann in jedem beliebigen Streckenelement existieren oder auch nicht.

Existiert ein Leiter in benachbarten Streckenelementen wird eine galvanische Durchverbindung angenommen.

An den Nahtstellen der Streckenelemente können die oben aufgeführten Quervermaschungen oder Erdableitungen eingefügt werden. Das betrifft auch die Selbstkapazitäten und Koppelkapazitäten zwischen allen Leitern, die zur Nachbildung der Influenzeigenschaften erforderlich sind.

Sind zwischen zwei Knoten auch galvanische Kopplungen vorhanden, machen diese die Kopplungskapazitäten praktisch unwirksam.

## Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

---

Die induktive Verkopplung wird über die Selbst- und Koppelkapazitäten zwischen allen Leitern in den Streckenelementen nachgebildet.

Das führt zur Aufstellung verschiedener Matrizen, die zu einer Matrixdarstellung führt, bei der die induktive Kopplung in einer Admittanzmatrix ausgedrückt werden kann.

Dadurch wird das Verfahren numerisch stabil.

# Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

---

## Zu behandelnde Szenarien

Als Fahrleitungssystem wird die **Fahrleitungsbauweise ÖBB 2.1** zu Grunde gelegt.

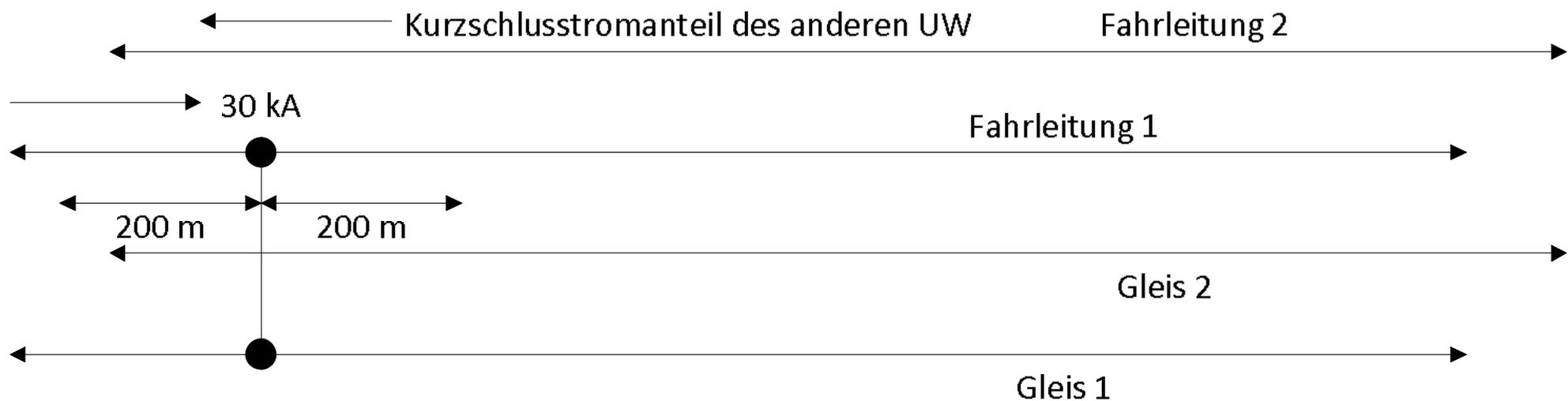
Die Regelabstände für die Gleisquerverbinder, die Schienenquerverbinder und der Anschlüsse der Rückleiterseile wird für die Untersuchung auf 600 m festgelegt. Tatsächlich sind die Abstände 650 m.

Der Ausbreitungswiderstand des Unterwerks wird ausgehend von früheren Untersuchungen für die ÖBB mit  $0,22 \Omega$  festgelegt.

# Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

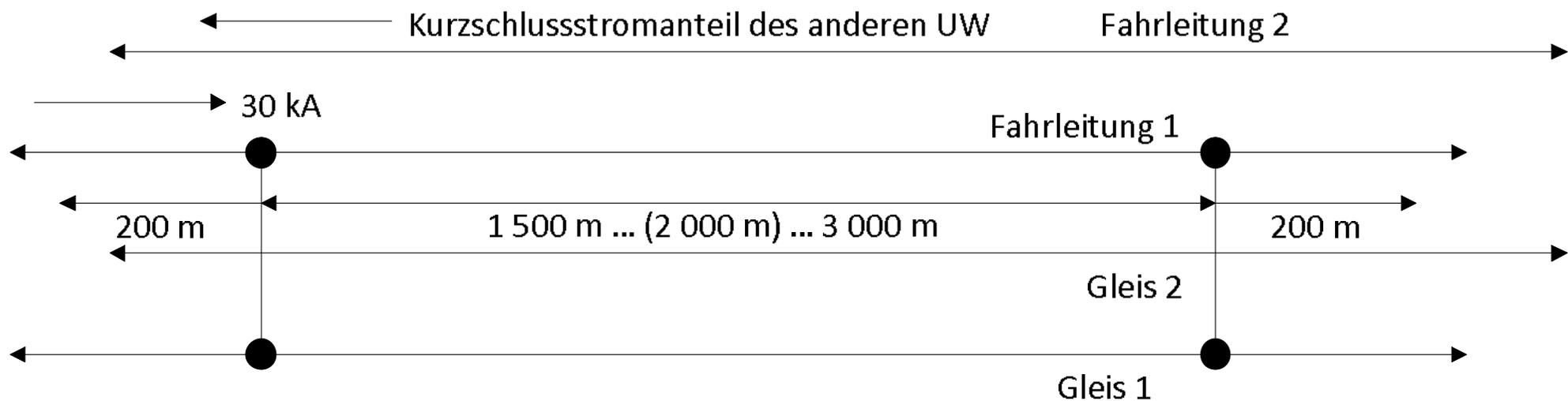
Szenarien für die zweigleisige Strecke - Kurzschlussstromuntersuchungen

Anordnung K1 Einseitige Speisung einer Erdungseinrichtung mit Kurzschluss



# Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

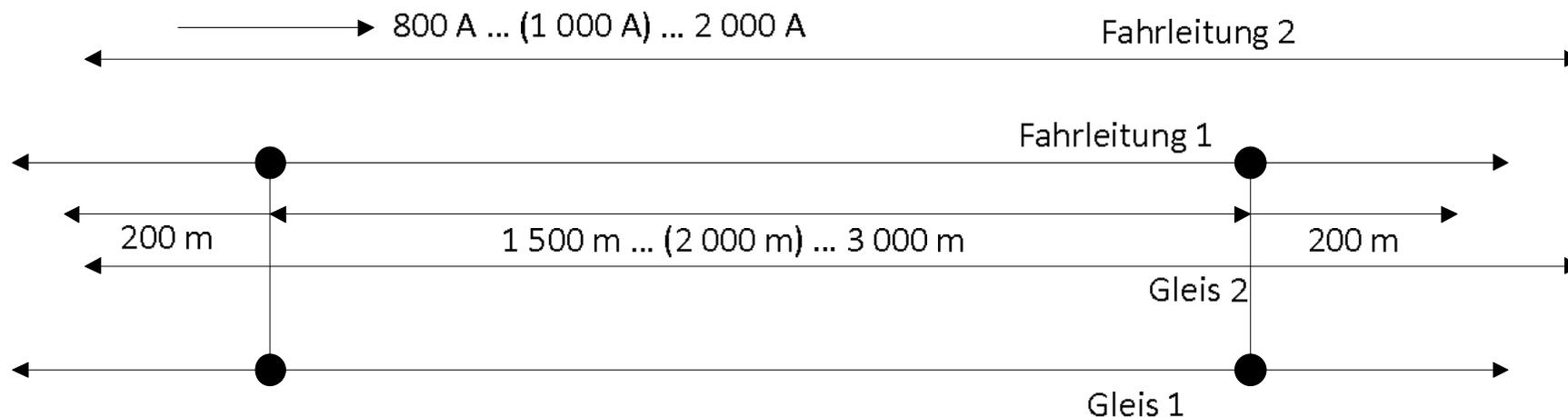
Anordnung K2 Einseitige Speisung eines durch beidseitige Erdungseinrichtungen gesicherten Arbeitsabschnitts mit Kurzschluss



# Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

Szenarien für die zweigleisige Strecke - Betriebsstromuntersuchungen

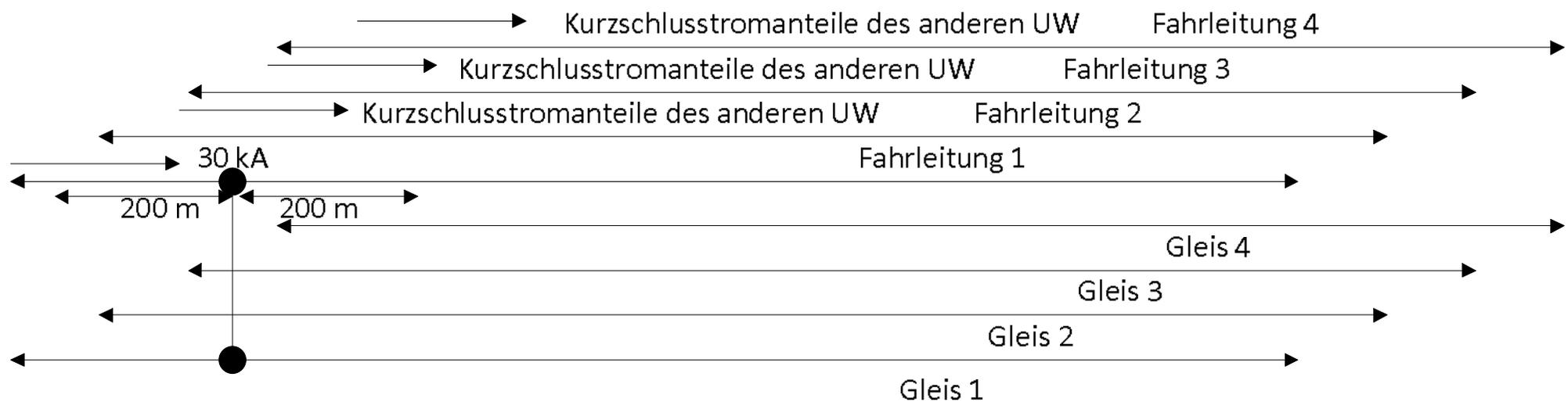
Anordnung B1 Beeinflussung eines durch beidseitige Erdungseinrichtungen gesicherten Arbeitsabschnitts mit Betriebsströmen im Nachbargleis



# Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

Szenarien für die Parallelführung zweier Trassen (Viergleisigkeit) - Kurzschlussstromuntersuchungen

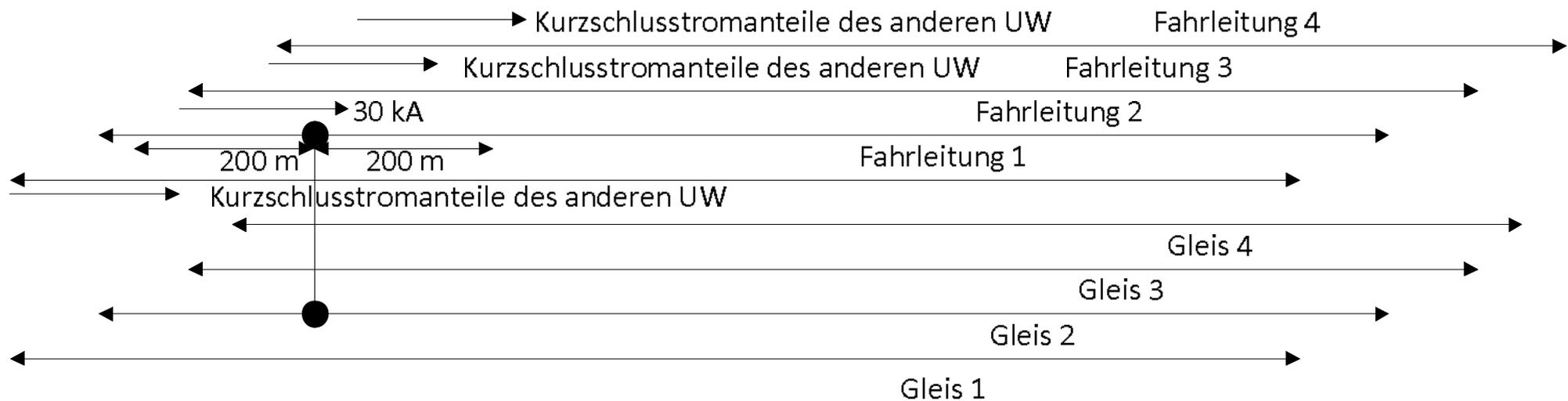
Anordnung K3 Einseitige Speisung einer Erdungseinrichtung mit Kurzschluss im abgewandten Gleis der zweiten Trasse



# Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

Szenarien für die Parallelführung zweier Trassen (Viergleisigkeit) - Kurzschlussstromuntersuchungen

Anordnung K4 Einseitige Speisung einer Erdungseinrichtung mit Kurzschluss im zugewandten Gleis der zweiten Trasse



# Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

Szenarien für die Parallelführung zweier Trassen (Viergleisigkeit) - Betriebsstromstromuntersuchungen

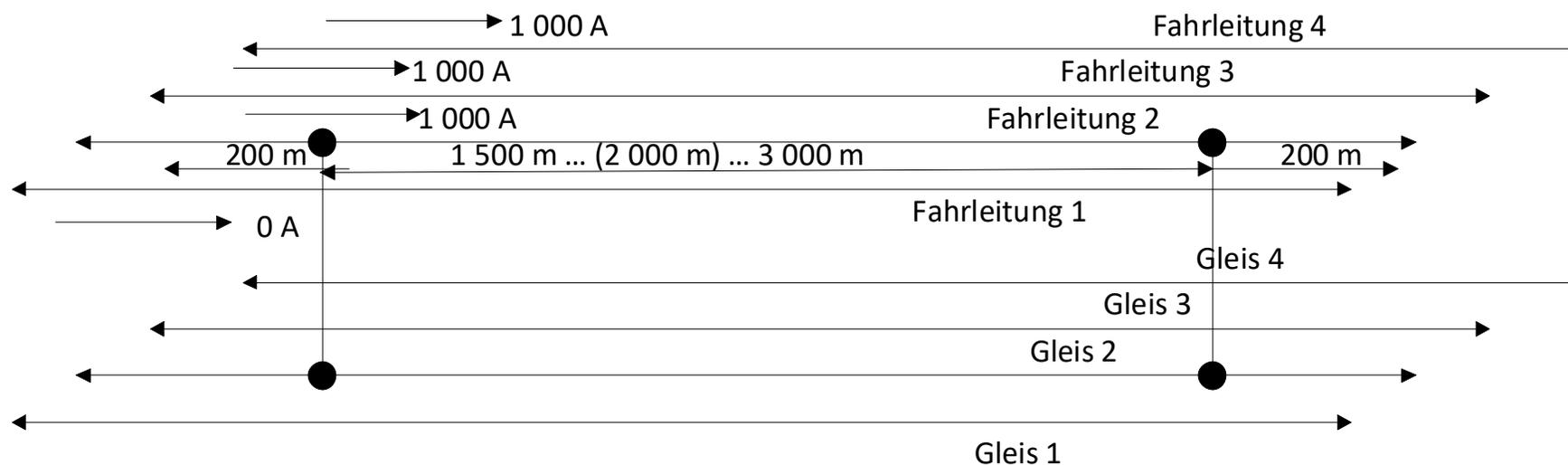
Anordnung B3 Beeinflussung eines durch beidseitige Erdungseinrichtungen gesicherten Arbeitsabschnitts im abgewandten Gleis mit Betriebsströmen in der Nachbartrasse



# Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

Szenarien für die Parallelführung zweier Trassen (Viergleisigkeit) - Betriebsstromstromuntersuchungen

Anordnung B4 Beeinflussung eines durch beidseitige Erdungseinrichtungen gesicherten Arbeitsabschnitts im zugewandten Gleis mit Betriebsströmen in der Nachbartrasse



# Modell zur Berechnung der grundsätzlichen Schutzwirkung von Erdungsmaßnahmen

---

## Variation des Gleismittenabstands

Die Untersuchungen im Kurzschluss- und Betriebsfall sollen durch die Variation des Gleistrassen-Mittenabstandes abgerundet werden.

Es soll dabei ausgehend der Gleis-Mitten-Abstand der jeweils zugewandten Gleise von 4 m, 10 m, 20 m, 30 m, 50 m, 100 m und 200 m variiert werden.

## 3 Untersuchungsergebnisse

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K1 – zweigleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss

Die Erstellung des Szenariums ist nicht trivial, weil ein einseitig gespeister Kurzschluss mit einer Stromstärke von 30 kA aus einem Unterwerk unter normalen Bedingungen (Netzersatzimpedanz des speisenden Netzes, begrenzte Zahl von Unterwerkstransformatoren) schwer erreichbar ist.

Die aus dem ÖBB-Netz bekannten hohen Kurzschlussstromstärkewerte (bis 40 kA beim Unterwerk Wien-Meidling) ergeben sich durch die Speisung aus mehreren Unterwerken auf die Kurzschlussstelle.

Durch eine extreme Verminderung des Unterwerksinnenwiderstandes (Speisung über vier Transformatoren mit 15 MVA Bemessungsleistung, Entfall der Ersatzimpedanz des vorgelagerten Netzes) konnte der hohe einseitig gespeiste Strom modelliert werden.

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K1 – zweigleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss

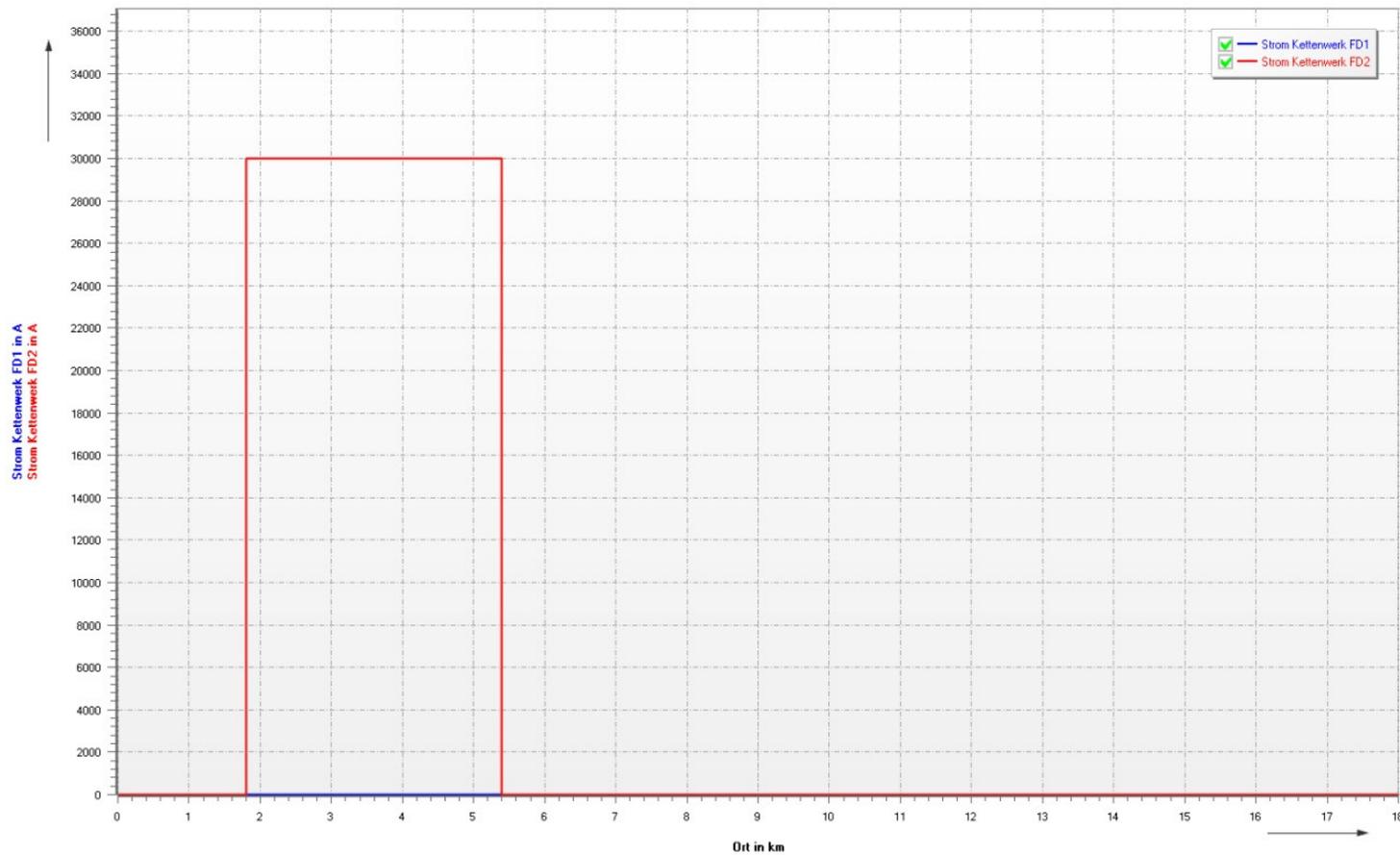
Bei der Modellierung wurde außerdem darauf Wert gelegt, dass die Kurzschlussstelle eine gewisse Entfernung vom einspeisenden Unterwerk hat, um die Ausbildung der Spannungsanhebung an der Fehlerstelle nachbilden zu können.

Das speisende Unterwerk wurde an km 1,8 positioniert, damit eine Schienen- und Gleisvermaschung am Speiseort stattfinden kann.

Die Kurzschlussstelle (Fahrdrabt 2 auf Schiene 2 Gleis 2) wurde an km 5,4 positioniert. Auch dort herrscht eine Schienen- und Gleisvermaschung.

Es ergeben sich folgende grundsätzliche Verläufe für die Kettenwerksströme und Leiter-spannungen:

## Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der  
 Kettenwerksstromstärken,  
 einseitige Speisung,  
 Kurzschluss km 5,4

## Untersuchungsergebnisse

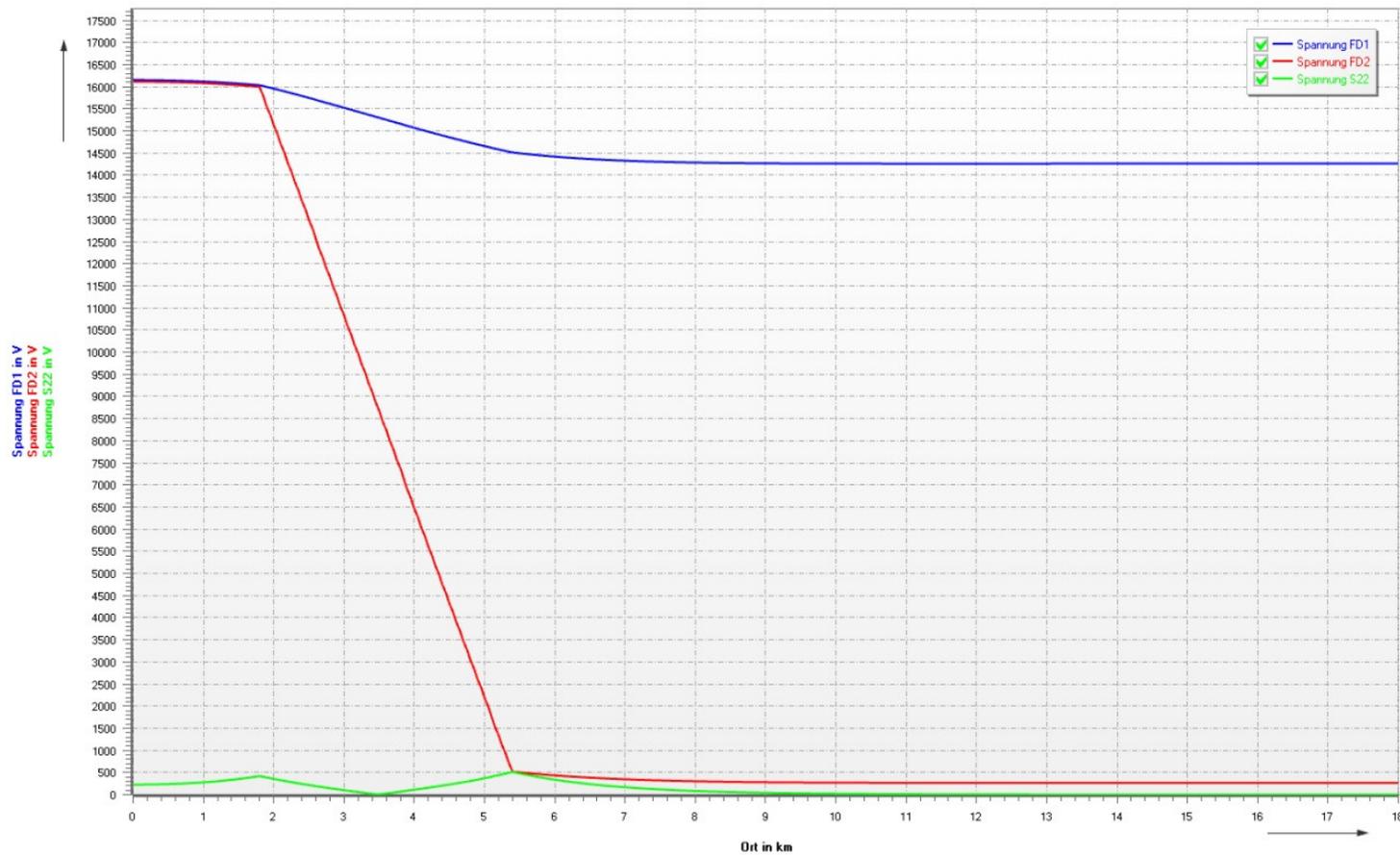
---

Szenarium K1 – zweigleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss

Im berechneten Fall beträgt der Kurzschlussstrom 30 kA.

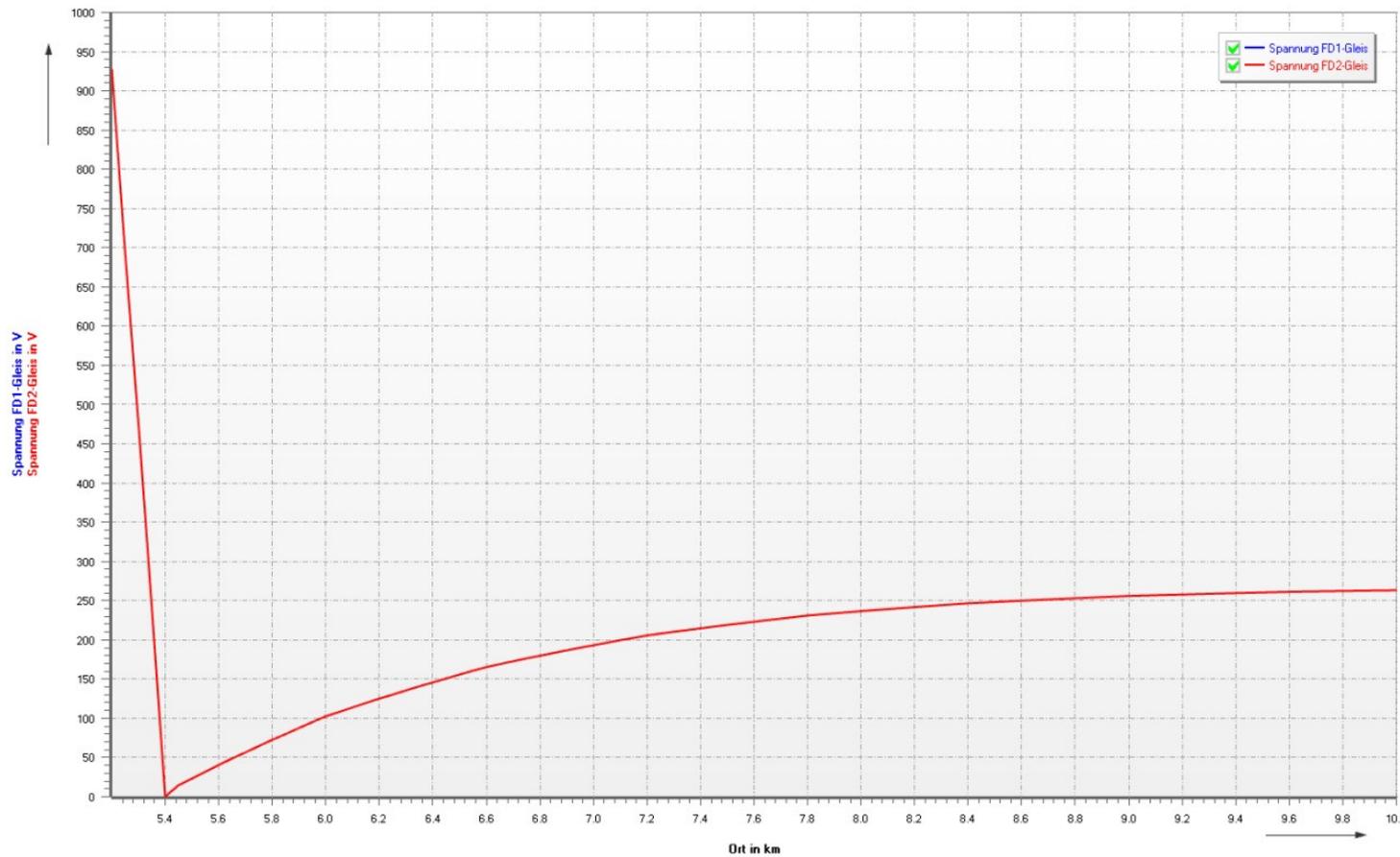
An den Standorten des Unterwerks und des Kurzschlusses sind die typischen Spannungsanhebungen in der Gleis-Erde-Spannung zu beobachten.

## Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Kettenwerksspannungen und Schienenspannungen, einseitige Speisung, Kurzschluss km 5,4

# Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Differenzspannung Kettenwerk- Gleis, (Körperspannung), einseitige Speisung, Kurzschluss km 5,4

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K1 – zweigleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss

zulässige Körperspannung für die Zeitdauer  $t = 0,1$  s mit  $U_{b,zul} = 345$  V

wird am **km 5,326**, also in einem **Abstand von 73,6 m** gerechnet vom Kurzschlussort (= Ort der eingehängten Erdungsstange) in Richtung speisendes Unterwerk erreicht.

In der anderen Richtung wird am km 12,0 eine **maximale Fahrdraht-Gleis-Spannung von 266,41 V** erreicht.

Das ist für eine Zeitdauer von  $t = 0,1$  s eine zulässige Körperspannung nach Tabelle 1. Damit ist der gesamte vom Unterwerk abgewandte Bereich geschützt..

## Untersuchungsergebnisse

**Tabelle 1: Höchstzulässige Körperspannungen  $U_{b, \max}$  bei Wechselstrombahnen in Abhängigkeit der Zeitdauer [EN 50122-1]**

Zeitdauer $t$ in s	Zulässige Körperspannung $U_{b, \max}$ in V
> 300	60
300	65
1	75
0,9	80
0,8	85
0,7	90
0,6	100
0,5	120
0,4	150
0,3	230
0,2	295
0,1	345
0,05	360
0,02	370

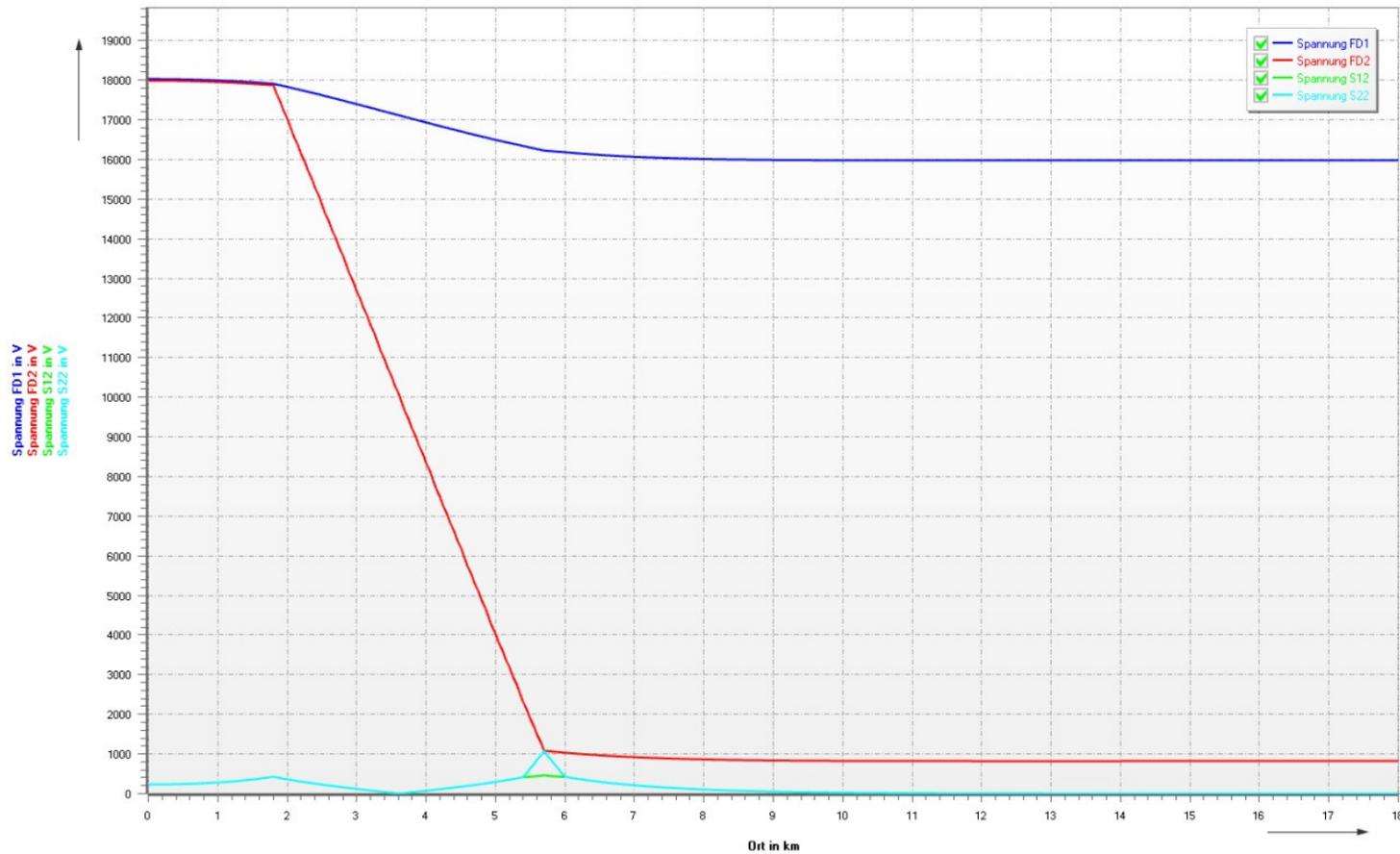
## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K1 – zweigleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss bei 5,7 km

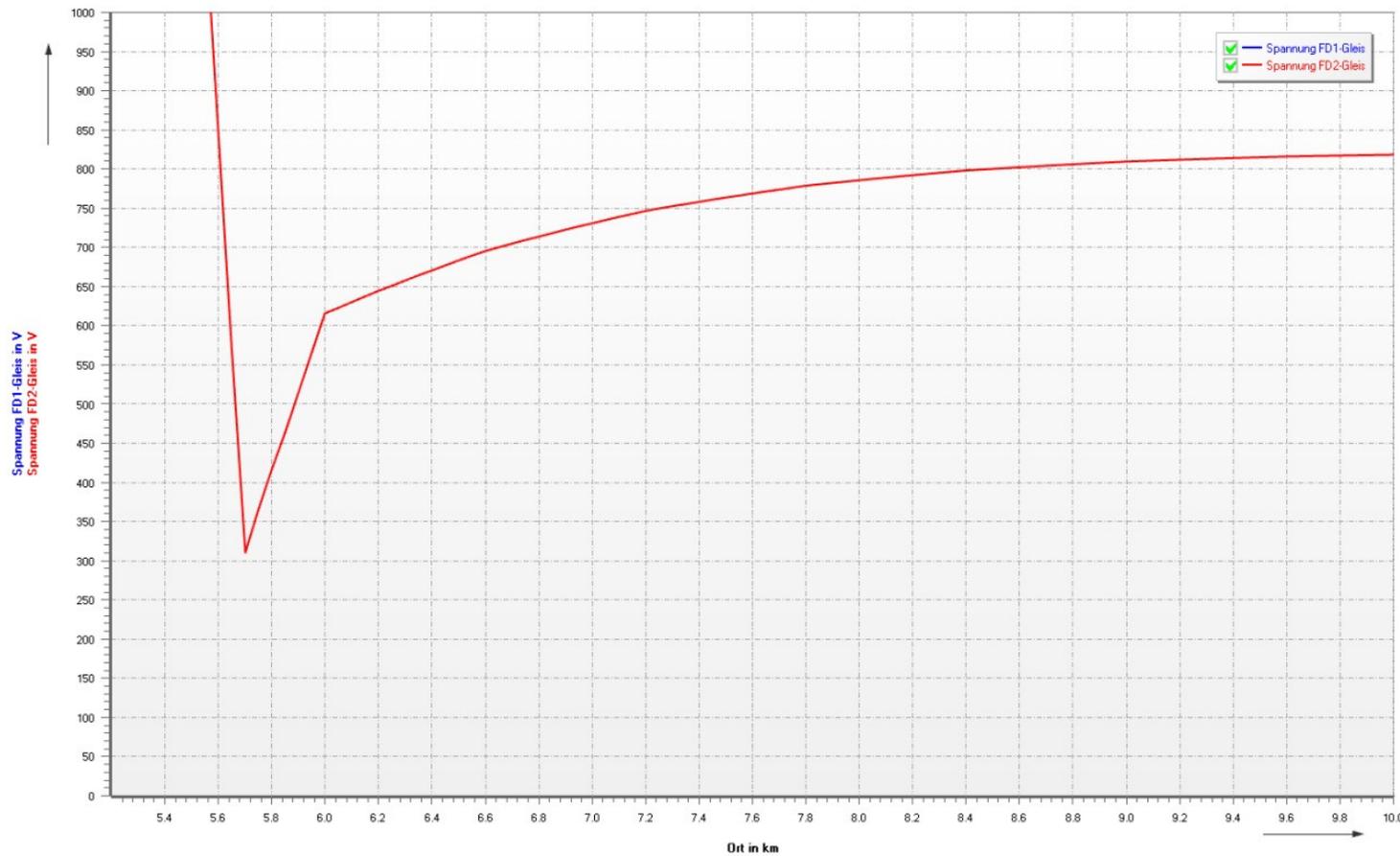
Zur Absicherung des Ergebnisses wurde der Kurzschlussort verschoben:  
**um 300 m** auf den Ort km 5,7, um **eine Stelle zwischen den** aller 600 m **angenommenen Schienen- und Gleisvermaschungen** zu untersuchen. Die **Kurzschlussstromstärke** wurde wieder auf **30 kA** iterativ eingestellt.

## Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Kettenwerksspannungen und Schienenspannungen, einseitige Speisung, Kurzschluss km 5,7

## Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Differenzspannung Kettenwerk- Gleis, (Körperspannung), einseitige Speisung, Kurzschluss km 5,7

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K1 – zweigleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss bei 5,7 km

Der Wert für die Reichweite in Richtung speisendes Unterwerk für  $t = 0,1$  s mit  $U_{b,zul} = 345$  V wird **nur am Kurzschlussort selbst** mit 310,6 V eingehalten.

Am km 5,694, genau **nach 6,4 m** gerechnet vom Kurzschlussort (= Ort der eingehängten Erdungsstange) in Richtung speisendes Unterwerk wird die zulässige Körperspannung ( $t = 0,1$  s,  $U_{b,zul} = 345$  V) erreicht.

In der anderen Richtung wird am km 5,731 also **nach 31 m** in der vom speisenden Unterwerk abgewandten Richtung hinter dem Ort der eingehängten Erdungsstange die maximal zulässige Körperspannung von  $U_{b,zul} = 345$  V erreicht. Der Schutzbereich ist daher sehr gering.

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K1 – zweigleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss bei 5,7 km

Zwischen den Vermaschungspunkten von Schienen und Gleisen baut sich längs der vom Kurzschluss betroffenen Schiene ein Spannungsfall bis zum Kurzschlussort auf.

Dieser Spannungsfall verbleibt hinter der Kurzschlussstelle als Potenzial des kurzschlussbehafteten Fahrdrachts bestehen, während das Schienenpotenzial zum nächsten Vermaschungspunkt hin wieder abnimmt.

Dadurch werden die unzulässigen Fahrdraht-Schienen-Potenziale erreicht.

## Untersuchungsergebnisse

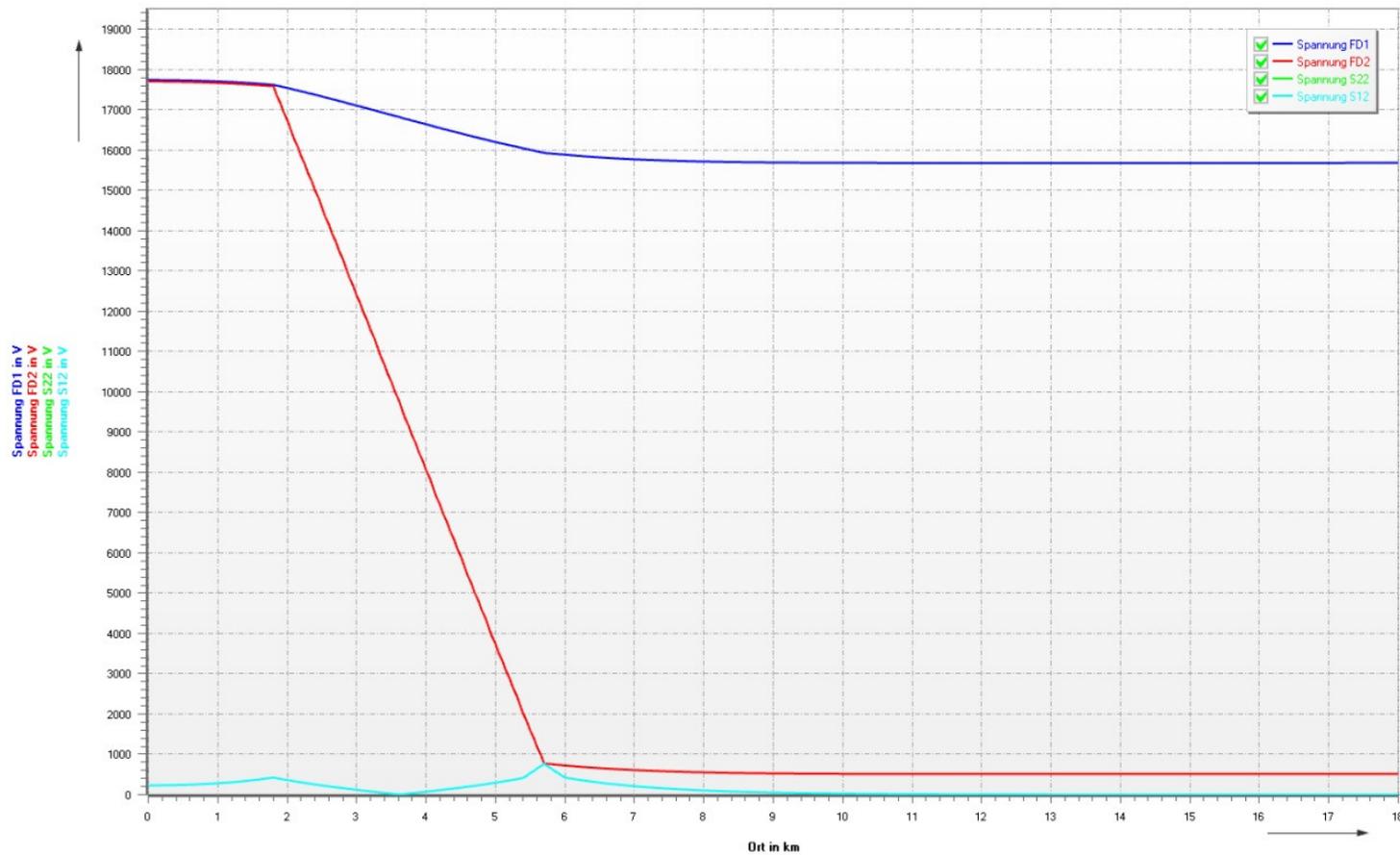
---

Szenarium K1 – zweigleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss bei 5,7 km vermascht

In die weiteren Betrachtungen wurde ein Kurzschlussort am km 5,7 mit einer **zusätzlich angenommenen Schienenvermaschung** (d. h. **die Erdungsstange verbindet Fahrdrabt und eine Schiene, zusätzlich wird noch eine Verbindung zur zweiten Schiene eingebaut**) untersucht.

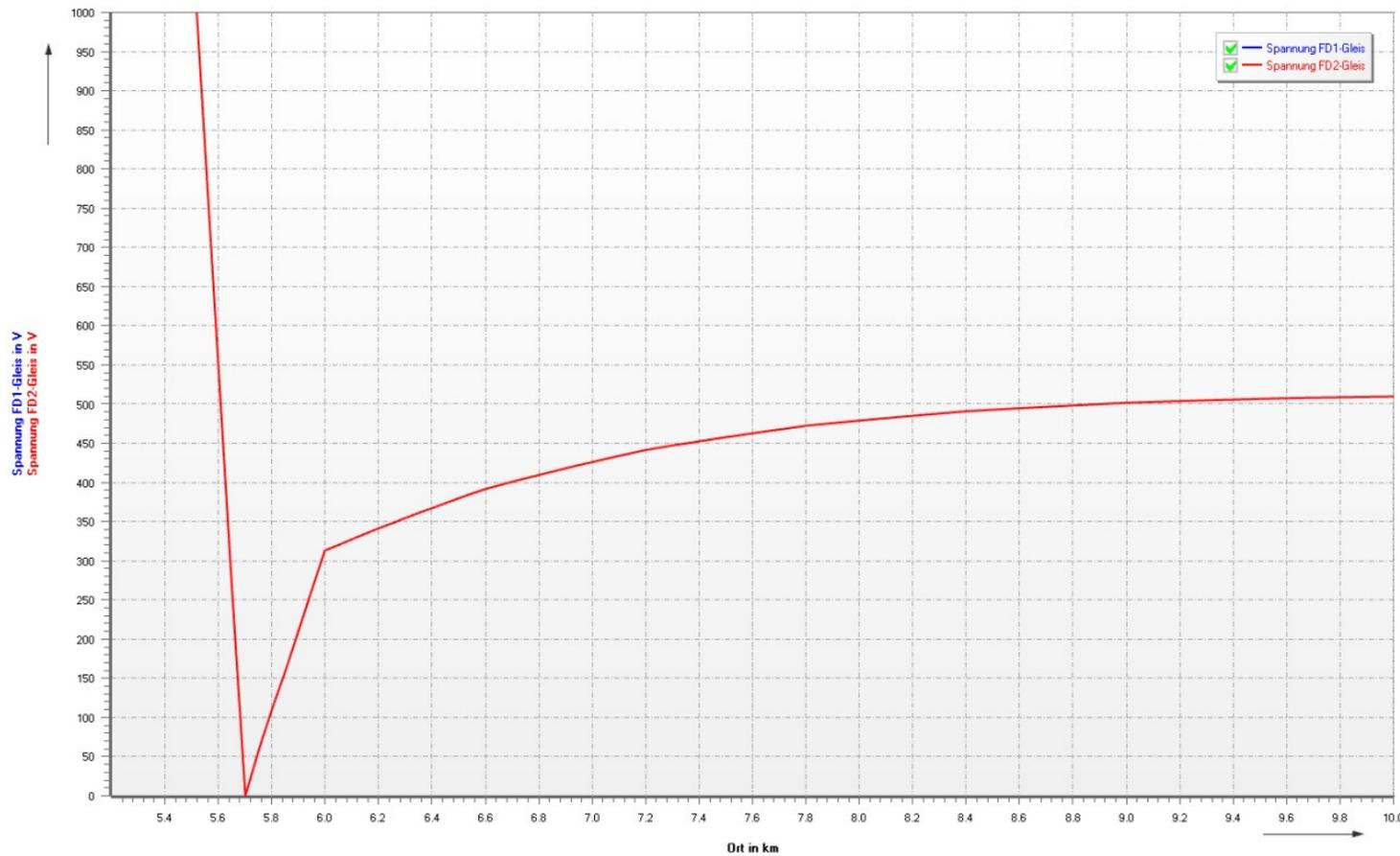
Die Kurzschlussstromstärke wurde wieder auf 30 kA iterativ eingestellt.

## Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Kettenwerksspannungen und Schienenspannungen, einseitige Speisung, Kurzschluss km 5,7, zusätzliche Schienenverbindung

## Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Differenzspannung Kettenwerk- Gleis, (Körperspannung), einseitige Speisung, Kurzschluss km 5,7 , zusätzliche Schienenverbindung

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K1 – zweigleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss bei 5,7 km vermascht

Die zulässige Körperspannung für die Zeitdauer  $t = 0,1$  s mit  $U_{b,zul} = 345$  V wird am km 5,638 also in einem Abstand **von 62,1 m gerechnet vom Kurzschlussort** (= Ort der eingehängten Erdungsstange) in Richtung speisendes Unterwerk erreicht.

In der anderen Richtung wird am km 6,288 also **nach 528,1 m** in der vom speisenden Unterwerk abgewandten Richtung hinter dem Ort der eingehängten Erdungsstange die maximal zulässige Körperspannung von  $U_{b,zul} = 345$  V erreicht und im weiteren **bis auf 512,48 V überschritten**.

Erst ab km 12 sinkt die Fahrdrabt-Gleis-Spannung wieder geringfügig ohne zulässige Werte der Körperspannung zu erreichen.

Dennoch kann festgestellt werden, dass **durch die zusätzliche Schienenvermaschung** am Ort der Erdungsstange der **Wirksamkeitsbereich** der Erdungseinrichtung **deutlich höher** ist.

## Untersuchungsergebnisse

---

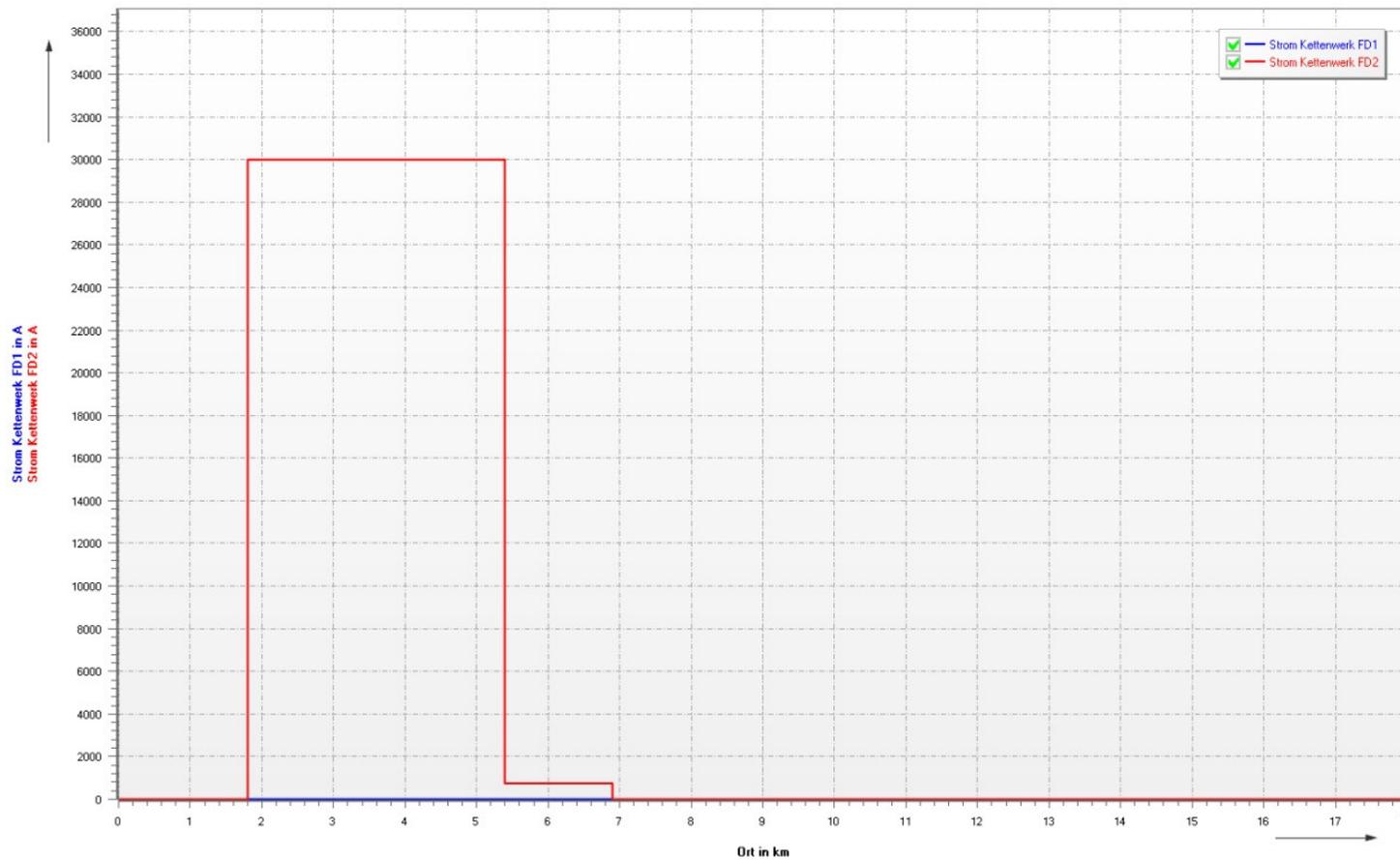
Szenarium K2 – zweigleisige Strecke, zwei Erdungseinrichtungen

In diesem Szenarium werden zwei Erdungseinrichtungen in einem bestimmten Abstand zwischen Fahrdrabt und Schiene eingehängt.

Das speisende Unterwerk wurde an km 1,8 positioniert, damit eine Schienen- und Gleisvermaschung am Speiseort stattfinden kann.

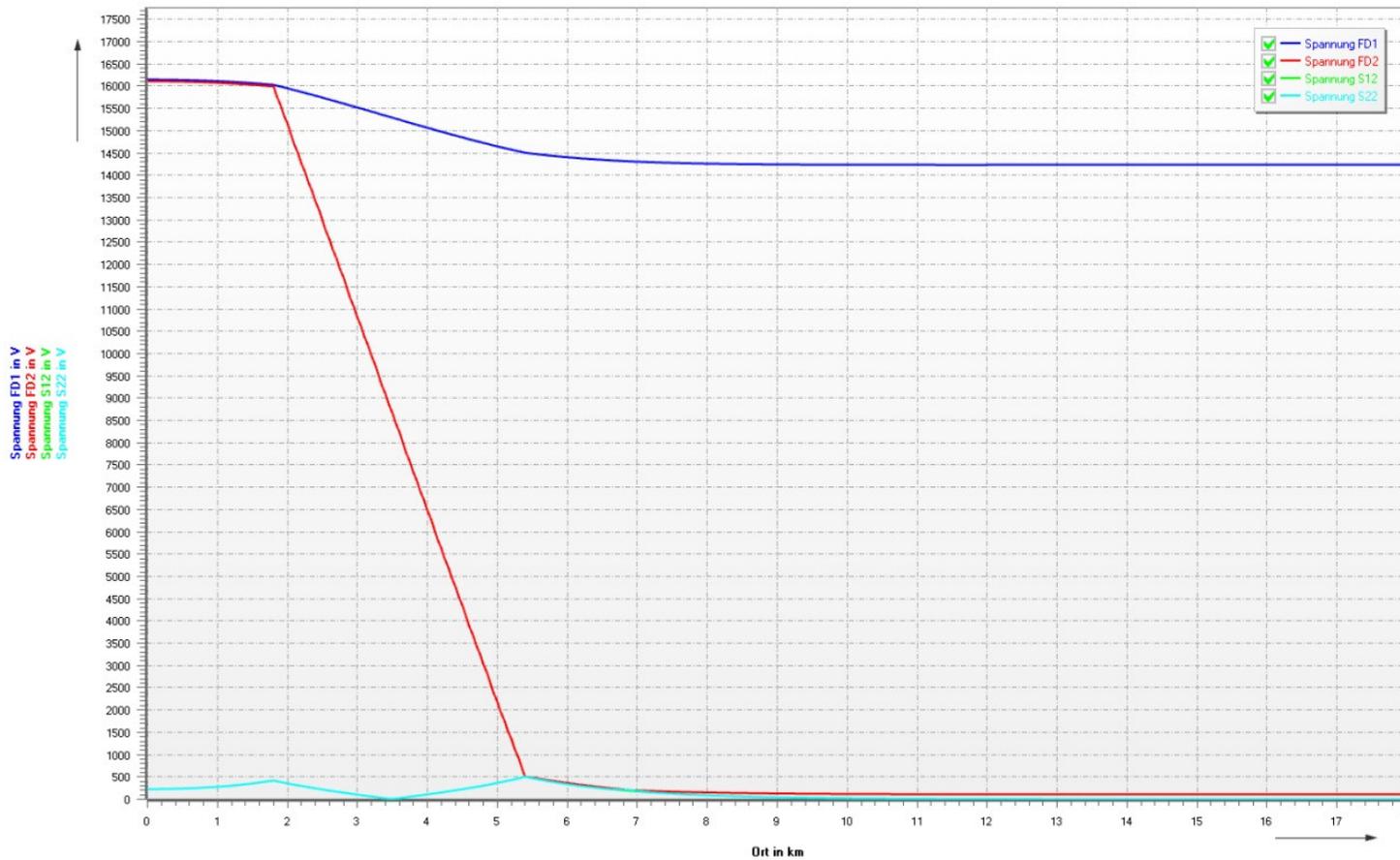
Die Kurzschlussstelle (Fahrdrabt 2 auf Schiene 2 Gleis 2) wurde im Abstand von 1 800 m an km 5,4 positioniert. Auch dort herrscht eine Schienen- und Gleisvermaschung. Der zweite Erdungspunkt liegt im Abstand 1 500 m entfernt an km 6,9.

## Untersuchungsergebnisse



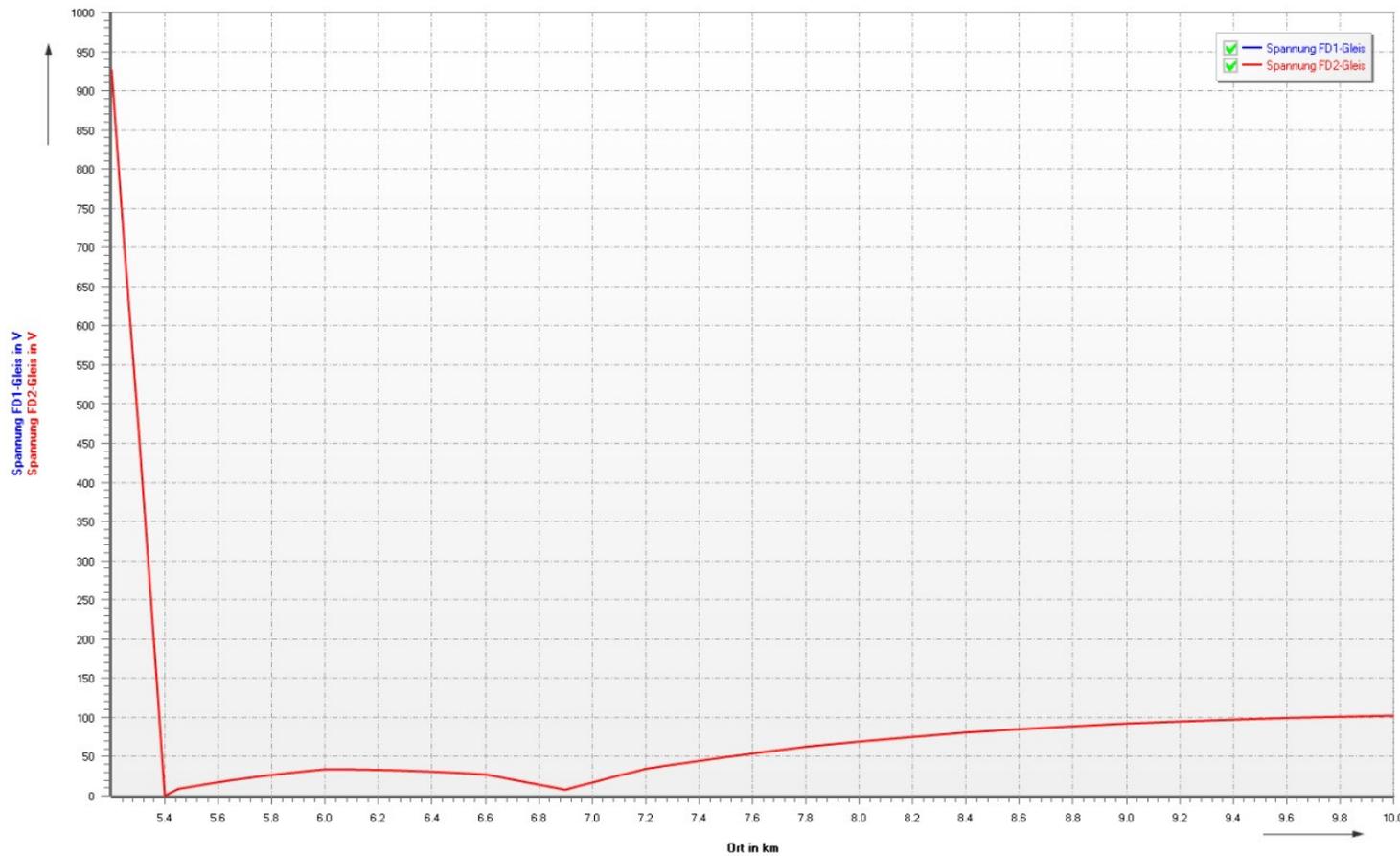
Ortsfunktion der Kettenwerksstromstärken, einseitige Speisung, zwei Erdungseinrichtungen, Kurzschluss km 5,4

# Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Kettenwerksspannungen und Schienenspannungen, einseitige Speisung, zwei Erdungseinrichtungen Kurzschluss km 5,4,

## Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Differenzspannung Kettenwerk- Gleis, (Körperspannung), einseitige Speisung, zwei Erdungseinrichtungen Kurzschluss km 5,4

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K2 – zweigleisige Strecke, zwei Erdungseinrichtungen

Die zulässige Körperspannung für die Zeitdauer  $t = 0,1$  s mit  $U_{b,zul} = 345$  V wird am km 5,334 also in einem Abstand von **66,4 m** gerechnet vom Kurzschlussort (= Ort der eingehängten Erdungsstange) in Richtung speisendes Unterwerk erreicht.

Hinter der zweiten Erdungseinrichtung wird erst am Streckenende der Modellstrecke eine Spannung von 102,23 V erreicht.

Zwischen den Erdungseinrichtungen wird  $U_{b,zul} = 345$  V nicht überschritten.

Der Maximalwert des Kettenwerks-Schiene-Potenzials beträgt 33,76 V am km 6,0.

Damit ist **der gesamte vom Unterwerk abgewandte Bereich** hinter der ersten Erdungseinrichtung **geschützt**.

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K3 – viergleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss im abgewandten Gleis

Es wird ein **einseitig gespeister Kurzschluss** mit einer Stromstärke von etwa 30 kA aus einem **Unterwerk 1 am Kilometer 1,8** mit extremer Verminderung des Unterwerksinnenwiderstandes (Speisung über vier Transformatoren mit 15 MVA Bemessungsleistung, Entfall der Ersatzimpedanz des vorgelagerten Netzes) modelliert.

Ein weiteres **Unterwerk 2 ist am Kilometer 16,2** angeordnet und speist nur in die Fahrleitungen der nicht kurzschlussbehafteten Gleise (2, 3 und 4) ein.

Da keine Lasten im Netz angeordnet sind (entspricht EN 60909-0, DIN VDE 0102), beteiligt sich das Unterwerk an der Speisung des Kurzschlussstroms. Im Bereich der einseitigen Speisung des Kurzschlusses (Unterwerk 1 bis Kurzschlussort) fließen diese Kurzschlussstromanteile dem Kurzschlussstrom im Gleis 1 entgegen.

## Untersuchungsergebnisse

---

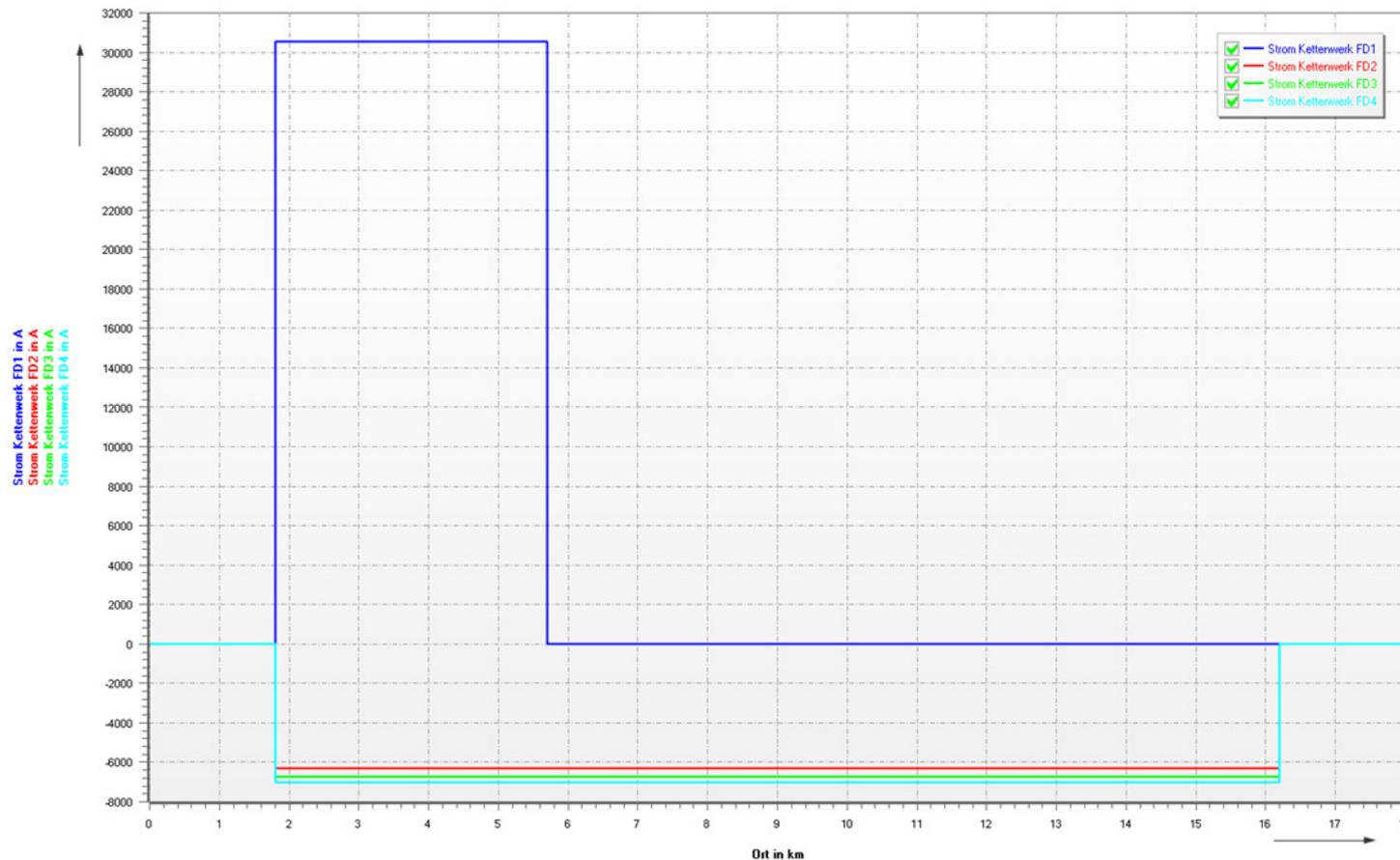
Szenarium K3 – viergleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss im abgewandten Gleis

Die Kurzschlussstelle hat wiederum eine gewisse Entfernung vom speisenden Unterwerk 1, um die Ausbildung der Spannungsanhebung an der Fehlerstelle nachbilden zu können.

Die Kurzschlussstelle wurde an km 5,7 positioniert.

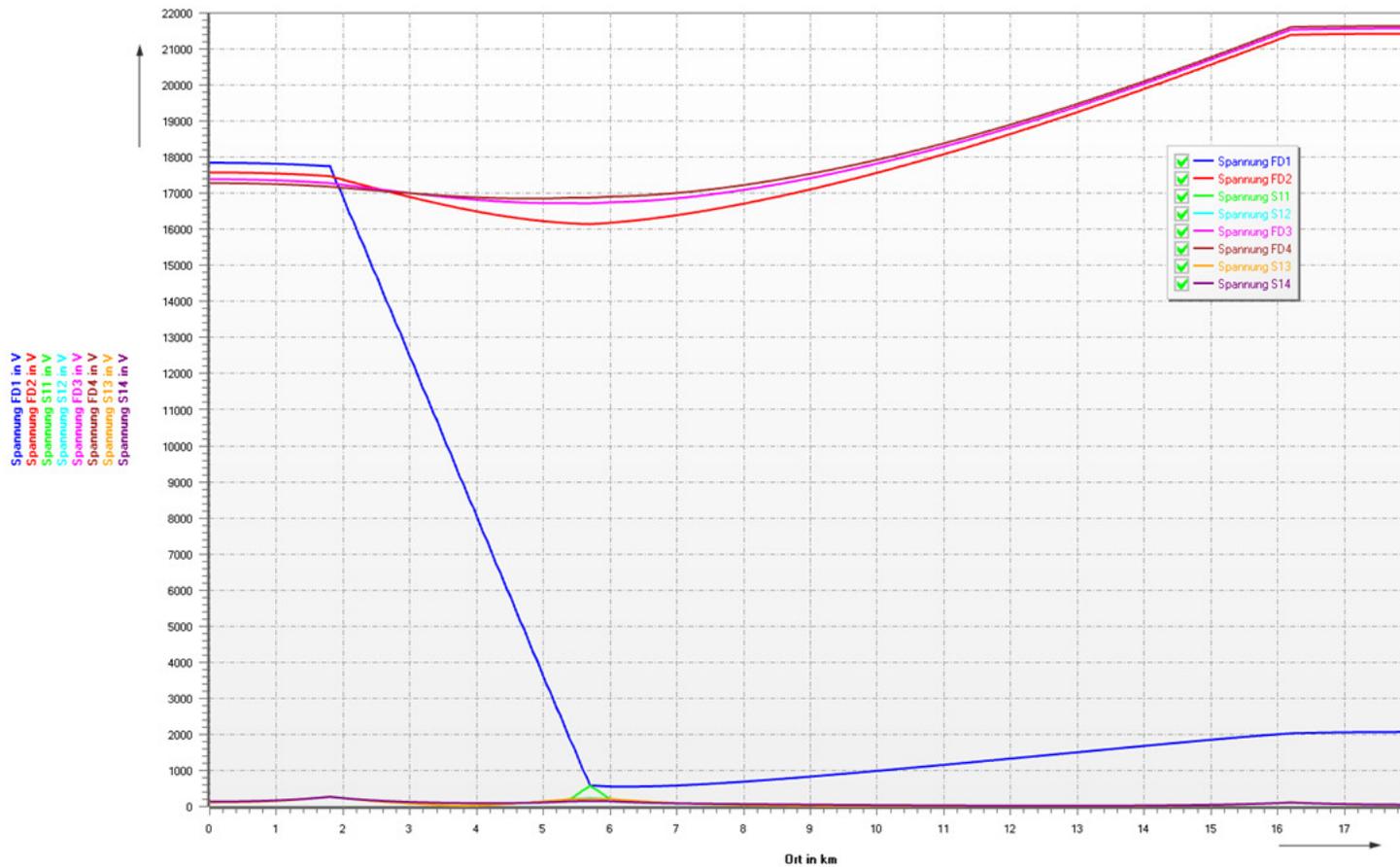
Die Erkenntnisse aus den Szenarien hinsichtlich einer erforderlichen Gleisvermaschung an der Kurzschlussstelle wurden durch die Anordnung der Kurzschlussbahn (Fahrdrabt 1 auf Schiene 1 Gleis 1 und Schiene 2 Gleis 1) berücksichtigt.

## Untersuchungsergebnisse



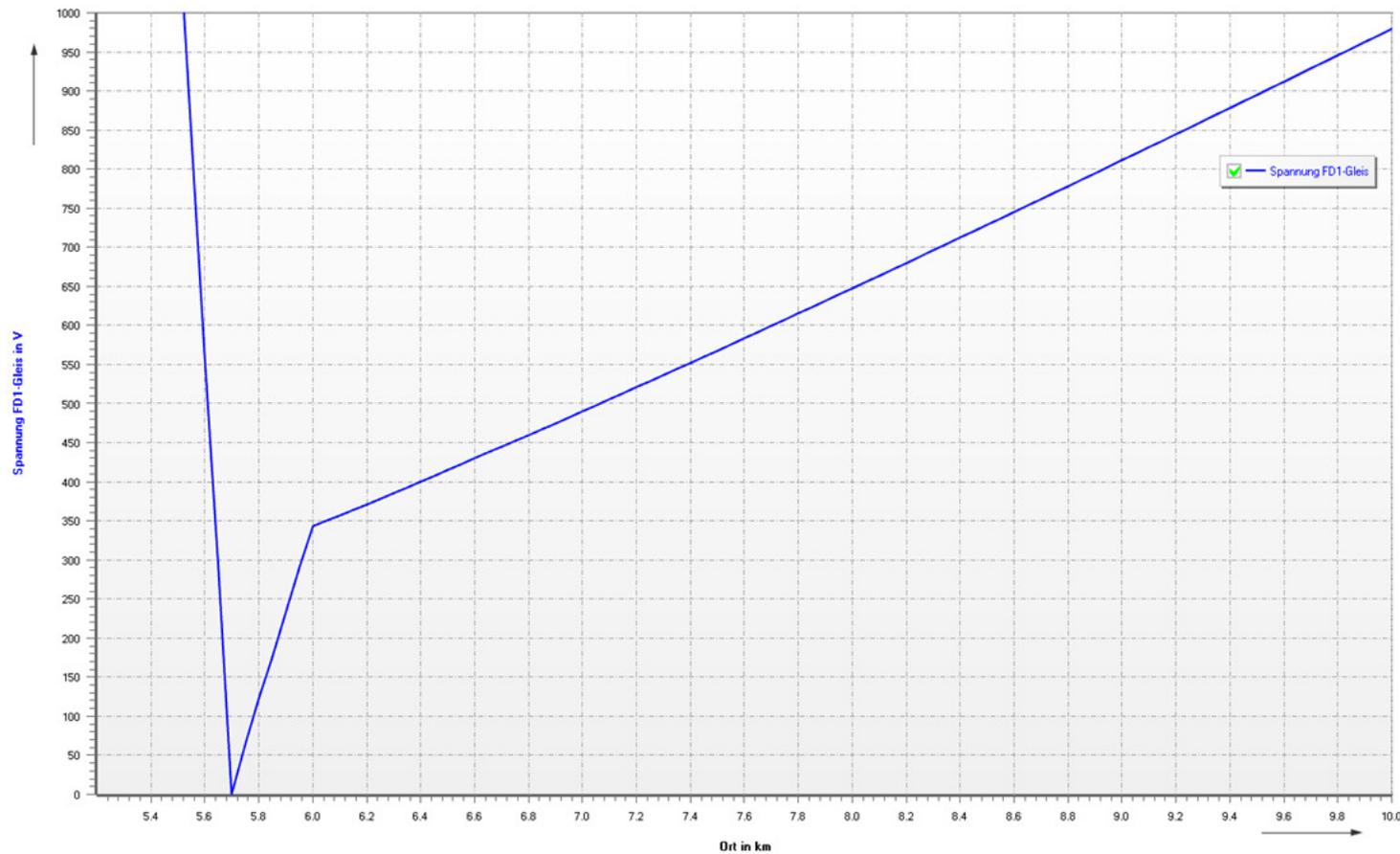
Ortsfunktion der Kettenwerksstromstärken, viergleisige Strecke, Trassenmittenabstand 4 m Kurzschluss Gleis 1 km 5,7, zusätzliche Schienenverbindung

# Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Kettenwerksspannungen und Schienenspannungen, viergleisige Strecke, Trassenmittenabstand 4 m Kurzschluss Gleis 1 km 5,7, zusätzliche Schienenverbindung

## Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Differenzspannung Kettenwerk- Gleis, (Körperspannung), einseitige Speisung, Kurzschluss km 5,7 , zusätzliche Schienenverbindung

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K3 – viergleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss im abgewandten Gleis

Im berechneten Fall beträgt die Kurzschlussstromstärke 30,542 kA.

Über die Fahrleitungen der Gleise 2, 3 und 4 werden jeweils ca. 6,3 kA, 6,7 kA bzw. 7,0 kA zum Unterwerk 1 geführt.

An den Standorten des Unterwerks und des Kurzschlusses sind die typischen Spannungsanhebungen in der Gleis-Erde-Spannung zu beobachten.

Die hohen Spannungen in den nicht kurzschlussbehafteten Fahrleitungen erklären sich aus der Tatsache, dass die Einspeisespannung im Unterwerk 2 höher als im Unterwerk 1 sein muss, wenn sich, wie gewünscht, das Unterwerk 2 an der Speisung des Kurzschlussstromes beteiligen soll.

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K3 – viergleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss im abgewandten Gleis

Es fällt die **Änderung des Spannungsgradienten am km 6,0** auf, der durch die dort liegende Gleis-/Rückleitungs-Vermaschung verursacht wird.

An diesem Ort stehen deutlich mehr Leiter für den Rückstrom zur Verfügung, weshalb die Gleis-Erde-Spannung einen geringeren Anstieg verzeichnet.

Die zulässige Körperspannung für die Zeitdauer  $t = 0,1$  s mit  $U_{b,zul} = 345$  V wird am km 5,63655 also in einem Abstand von **62,45 m** gerechnet vom Kurzschlussort (= Ort der eingehängten Erdungsstange) in Richtung speisendes Unterwerk erreicht.

In der anderen Richtung wird am km 6,013 die zulässige Fahrdrabt-Gleis-Spannung erreicht. Das ist für eine Zeitdauer von  $t = 0,1$  s eine zulässige Körperspannung. Damit sind **313 m des vom Unterwerk abgewandten Bereichs geschützt**.

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K3 – viergleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss im abgewandten Gleis

### **Gleis-Trassenmittenabstand 200 m**

Die zulässige Körperspannung wird in einem Abstand von **61,4 m** gerechnet vom Kurzschlussort (= Ort der eingehängten Erdungsstange) in Richtung speisendes Unterwerk erreicht.

In der anderen Richtung wird am km 6,1145 die zulässige Fahrdrabt-Gleis-Spannung erreicht. Das ist für eine Zeitdauer von  $t = 0,1$  s eine zulässige Körperspannung. Damit sind **415,5 m des vom Unterwerk abgewandten Bereichs geschützt**.

## Untersuchungsergebnisse

### Szenarium K3 – viergleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss im abgewandten Gleis

Tabelle 2: Wirksamkeitsbereich Erdungseinrichtung, Kurzschluss Gleis 1 am km 5,7

Szenarium	Gleis-Trassen-Mittenabstand	$I_k$ in kA	Ort 1 $U_{b,max}$ in km	Abstand vom Kurzschlussort in m		Ort 2 $U_{b,max}$ in km	Abstand vom Kurzschlussort in m	
				berechnet	korrigiert auf 30 kA		berechnet	korrigiert auf 30 kA
K3	4 m	30,542	5,6366	63,5	64,6	6,0130	313,0	318,7
	10 m	29,786	5,6382	61,8	61,4	6,1685	468,5	465,2
	20 m	29,980	5,6380	62,0	62,0	6,1342	432,2	433,9
	30 m	29,974	5,6370	63,0	62,9	6,1330	433,0	432,6
	50 m	29,986	5,6336	66,4	66,4	6,1297	429,7	429,5
	100 m	29,966	5,6378	62,2	62,1	6,1243	424,3	423,8
	200 m	30,011	5,6386	61,4	61,4	6,1145	414,5	414,7

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K3 – viergleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss im abgewandten Gleis

Die Gleis-Trassen-Entfernung hat auf der dem speisenden Unterwerk zugewandten Seite einen eher unwesentlichen Einfluss hat.

Der Wirksamkeitsbereich beträgt etwa 61 m ... 67 m.

Auf der dem speisenden Unterwerk abgewandten Seite ist der Einfluss stärker.

Der Wirksamkeitsbereich beträgt etwa 307 m ... 471 m.

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K4 – viergleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss im zugewandten Gleis

Einseitig gespeister Kurzschluss mit Stromstärke von etwa 30 kA aus einem Unterwerk 1 am Kilometer 1,8

Ein weiteres Unterwerk 2 ist am Kilometer 16,2 angeordnet und speist nur in die Fahrleitungen der nicht kurzschlussbehafteten Gleise (1, 3 und 4) ein.

Da keine Lasten im Netz (EN 60909-0, VDE 0102), beteiligt sich das Unterwerk an der Speisung des Kurzschlussstroms.

Im Bereich der einseitigen Speisung des Kurzschlusses (Unterwerk 1 bis Kurzschlussort) fließen diese Kurzschlussstromanteile dem Kurzschlussstrom im Gleis 2 entgegen.

Die Kurzschlussstelle wurde an km 5,7 positioniert. Die Kurzschlussstelle verfügt über die Kurzschlussbahn Fahrdraht 2 auf Schiene 1 Gleis 2 und Schiene 2 Gleis 2.

## Untersuchungsergebnisse

### Szenarium K4 – viergleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss im zugewandten Gleis

Tabelle 3: Wirksamkeitsbereich Erdungseinrichtung, Kurzschluss Gleis 2 am km 5,7

Szenarium	Gleis-Trassen-Mittenabstand	$I_k$ in kA	Ort 1 $U_{b,max}$ in km	Abstand vom Kurzschlussort in m		Ort 2 $U_{b,max}$ in km	Abstand vom Kurzschlussort in m	
				berechnet	korrigiert auf 30 kA		berechnet	korrigiert auf 30 kA
K4	4 m	29,988	5,6374	62,6	62,6	5,9827	282,7	282,6
	10 m	29,209	5,6365	63,5	61,8	6,0977	397,7	387,2
	20 m	28,714	5,6327	67,3	64,4	6,2558	558,8	532,0
	30 m	28,717	5,6357	64,3	61,6	6,2525	552,5	528,9
	50 m	28,706	5,6357	64,3	61,5	6,2469	546,9	523,3
	100 m	28,703	5,6353	64,7	61,9	6,2340	534,0	510,9
	200 m	28,699	5,6357	64,3	61,5	6,2171	517,1	497,7

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium K4 – viergleisige Strecke, eine Erdungseinrichtung mit Kurzschluss im zugewandten Gleis

Die Gleis-Trassen-Entfernung hat auf der dem speisenden Unterwerk zugewandten Seite einen eher unwesentlichen Einfluss hat.

Der Wirksamkeitsbereich beträgt etwa 61 m ... 65 m.

Auf der dem speisenden Unterwerk abgewandten Seite ist der Einfluss stärker.

Der Wirksamkeitsbereich beträgt etwa 282 m ... 532 m.

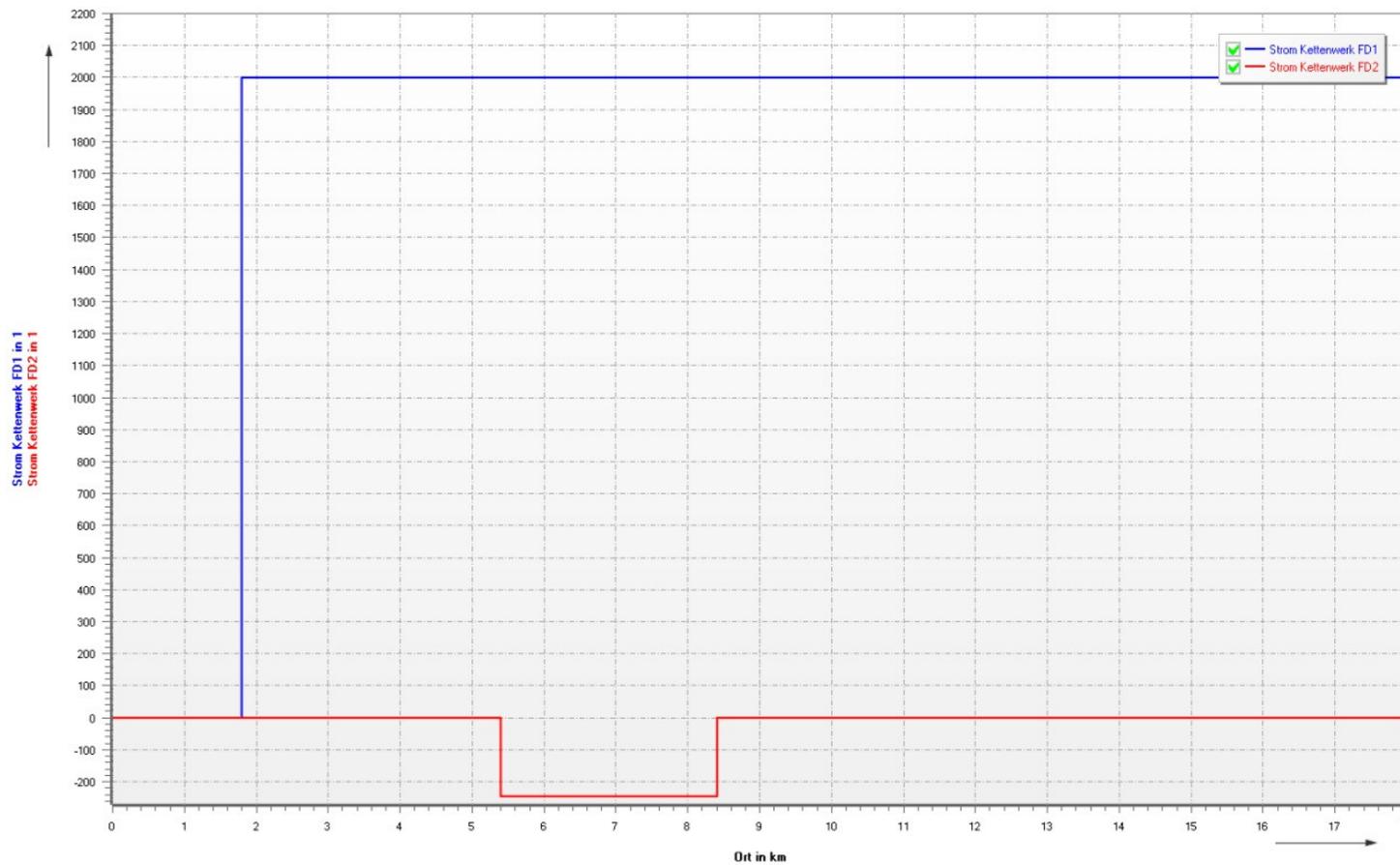
## Untersuchungsergebnisse

### Szenarium B1 – zweigleisig, zwei Erdungseinrichtungen, Betriebsströme Nachbargleis

**Tabelle 4: Maximale Körperspannung und Stromstärke im geerdeten Kettenwerk bei zwei Erdungseinrichtungen (zweigleisige Strecke)**

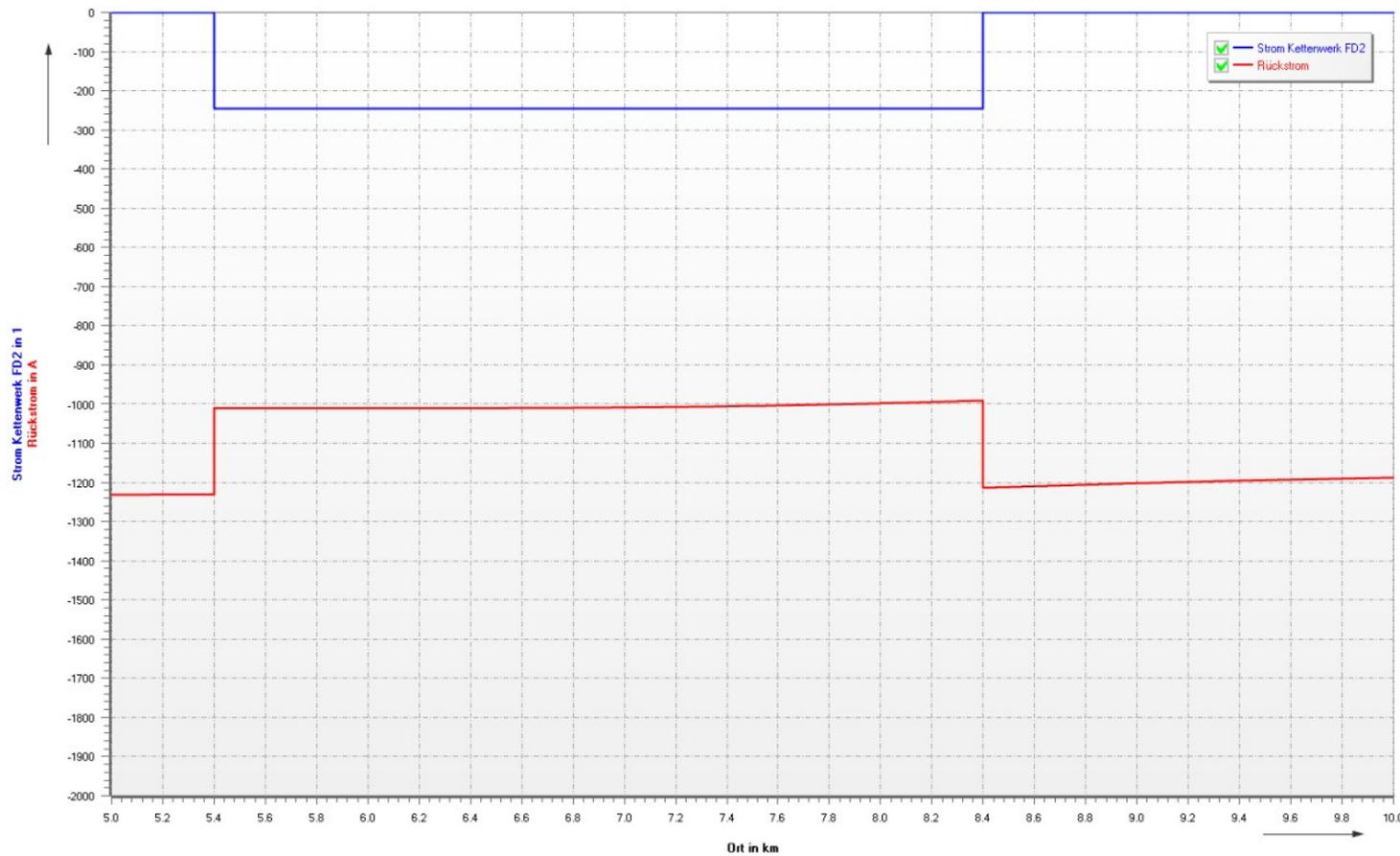
Strom im Betriebsgleis in A	Abstand der Erdungseinrichtungen in m	maximale Körperspannung $U_{b,max}$ in V	Stromstärke im geerdeten Kettenwerk in A
800	1 500	0,66	95
	2 000	0,67	95
	3 000	0,09	98
1 000	1500	0,82	117
	2 000	0,84	119
	3 000	0,11	123
2 000	1 500	1,64	235
	2 000	1,68	238
	3 000	0,22	246

## Untersuchungsergebnisse



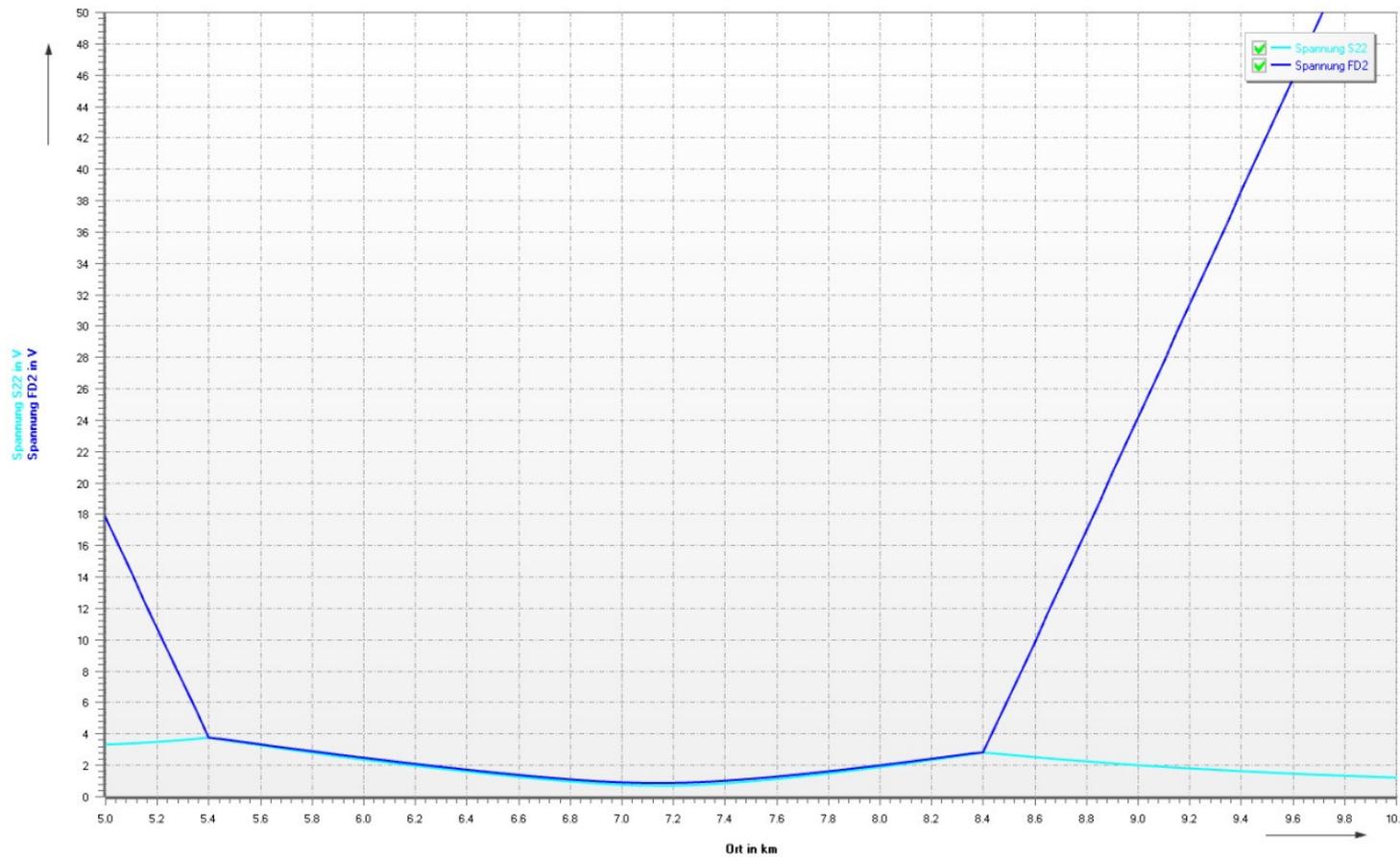
Ortsfunktion der Stromstärken im geerdeten Kettenwerk und im Rückleitungssystem zwischen den Erdungseinrichtungen Betriebsstromstärke 2 kA, Abstand der Erdungseinrichtungen 3 km

## Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Stromstärken im geerdeten Kettenwerk (FD2) zwischen den Erdungseinrichtungen und im Kettenwerk des Betriebsgleises (FD1), Betriebsstromstärke 2 kA, Abstand der Erdungseinrichtungen 3 km

## Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Spannungen im geerdeten Kettenwerk (FD2) und der Schiene 2 Gleis 2 zwischen den Erdungseinrichtungen, Betriebsstromstärke 2 kA, Abstand der Erdungseinrichtungen 3 km

## Untersuchungsergebnisse

---

Szenarium B1 - zwei Erdungseinrichtungen, Betriebsströme im Nachbargleis

Maximalwerte der Fahrdrabt-Gleis-Spannungen deutlich unter der zulässigen dauerhaften Körperspannung von 60 V.

Für die Berechnungen ist zu bemerken, dass durch die induzierte Spannung infolge des Fahrleitungsstroms im Betriebsgleis ein Strom in der Schleife

**Erdungseinrichtung 1 - geerdeter Fahrdrabt – Erdungseinrichtung 2 – Rückleitungssystem – Erdungseinrichtung 1**

ausbildet.

Dieser Strom hat gegenüber dem Fahrleitungsstrom im Betriebsgleis umgekehrten Richtungssinn (Phasenlage), da die induzierte Spannung ihrer Ursache - dem Strom im Betriebsgleis – entgegengesetzt ist.

Das führt für den Bereich zwischen den Erdungseinrichtungen zur Verminderung des Stroms im Rückleitungssystem.

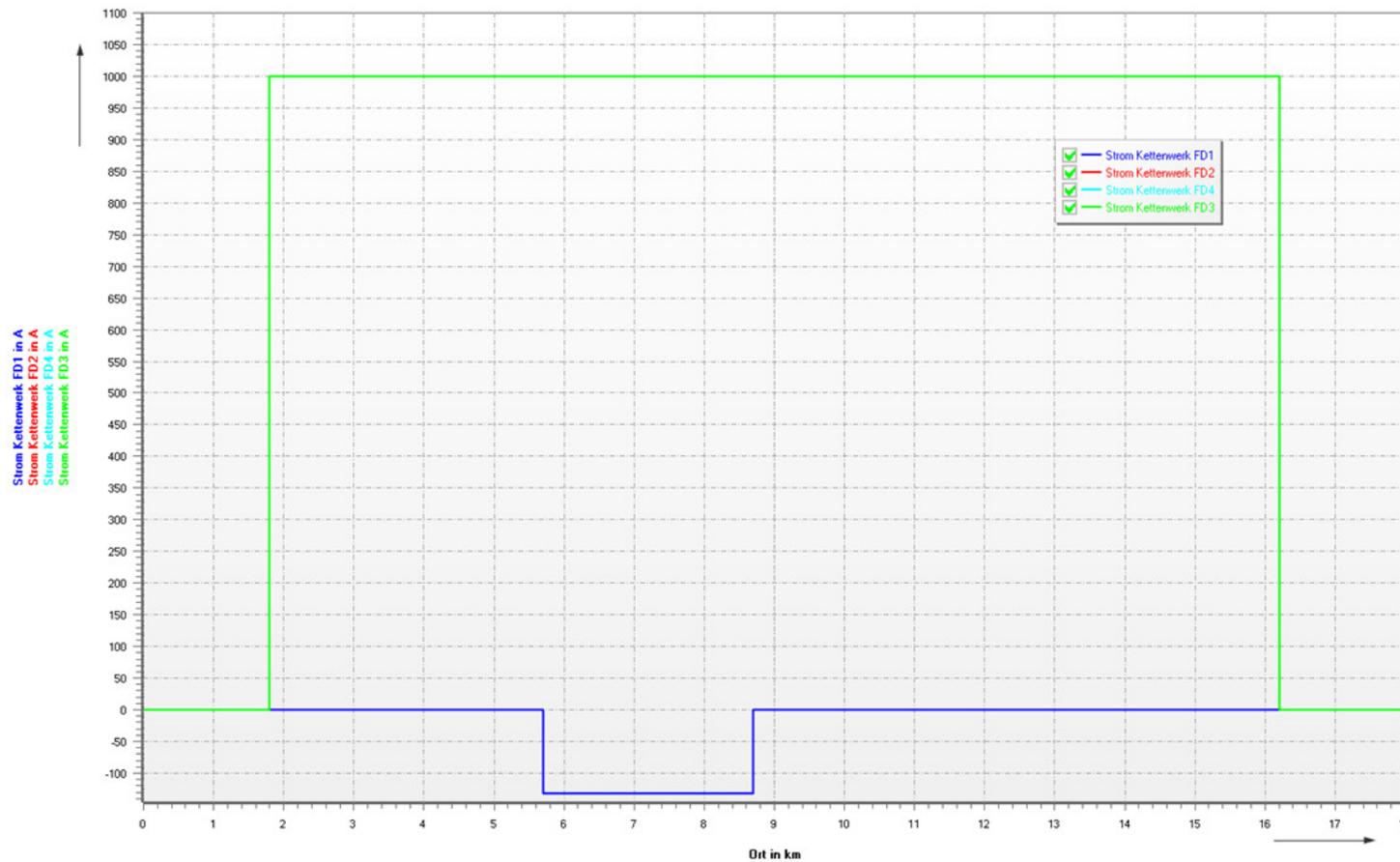
## Untersuchungsergebnisse

### Szenarium B3 – viergleisig, zwei Erdungseinrichtungen abgewandtes Gleis, Betriebsströme Nachbartrasse

Tabelle 5: Maximale Körperspannung und Stromstärke im zweiseitig geerdeten Kettenwerk Gleis 1 (viergleisige Strecke)

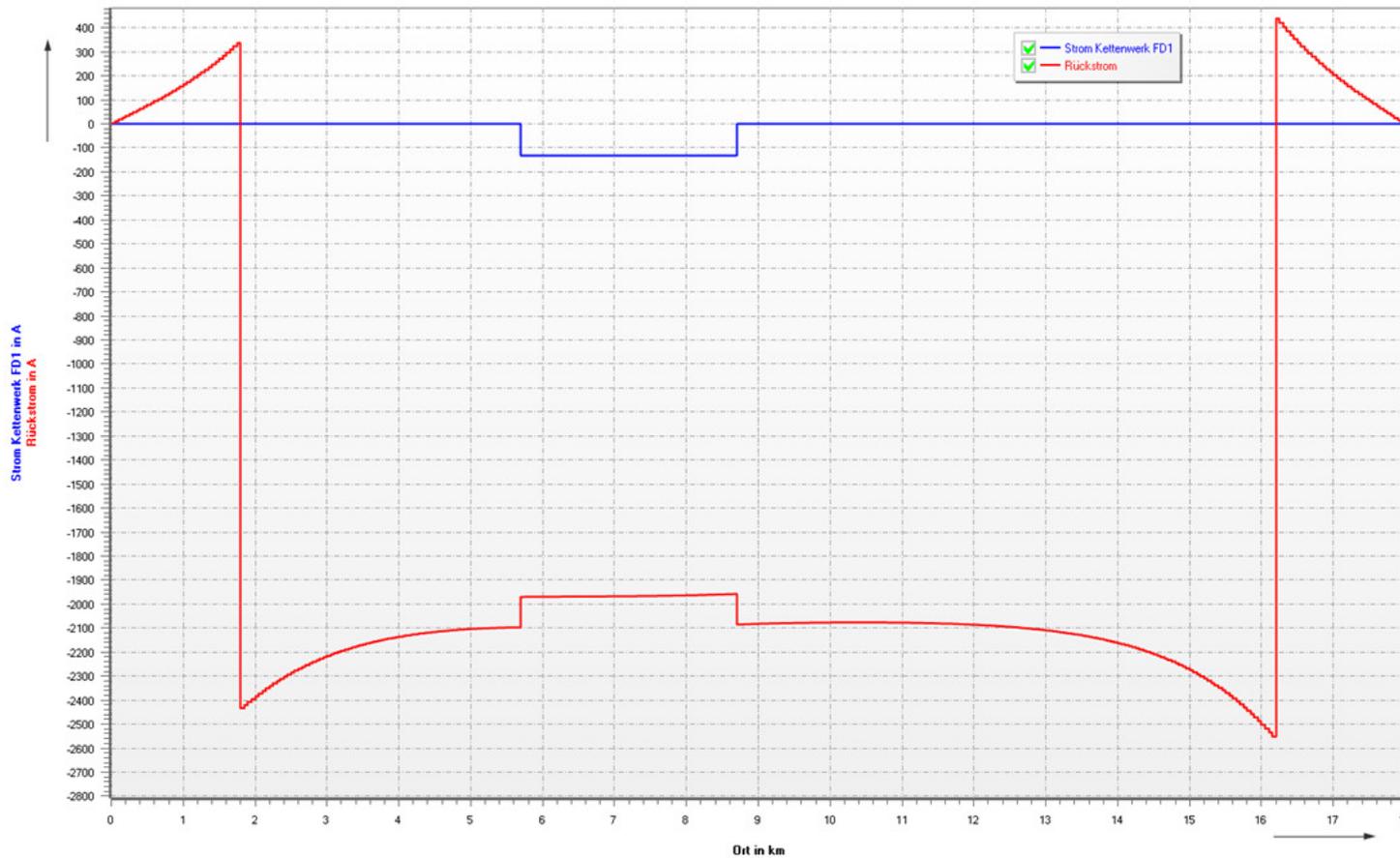
Abstand der Erdungseinrichtungen in m	Gleis-Trassen-Mittenabstand	maximale Körperspannung $U_{b,max}$ in V	Stromstärke im geerdeten Kettenwerk in A
<b>1 500</b>	4 m	0,65	170
	10 m	0,51	135
	20 m	0,51	132
	30 m	0,51	132
	50 m	0,50	132
	100 m	0,50	132
	200 m	0,49	131
	<b>2 000</b>	4 m	0,64
10 m		0,50	135
20 m		0,49	132
30 m		0,49	132
50 m		0,49	132
100 m		0,49	132
200 m		0,48	132
<b>3 000</b>		4 m	0,70
	10 m	0,56	136
	20 m	0,55	133
	30 m	0,55	133
	50 m	0,55	133
	100 m	0,55	133
	200 m	0,54	133

## Untersuchungsergebnisse



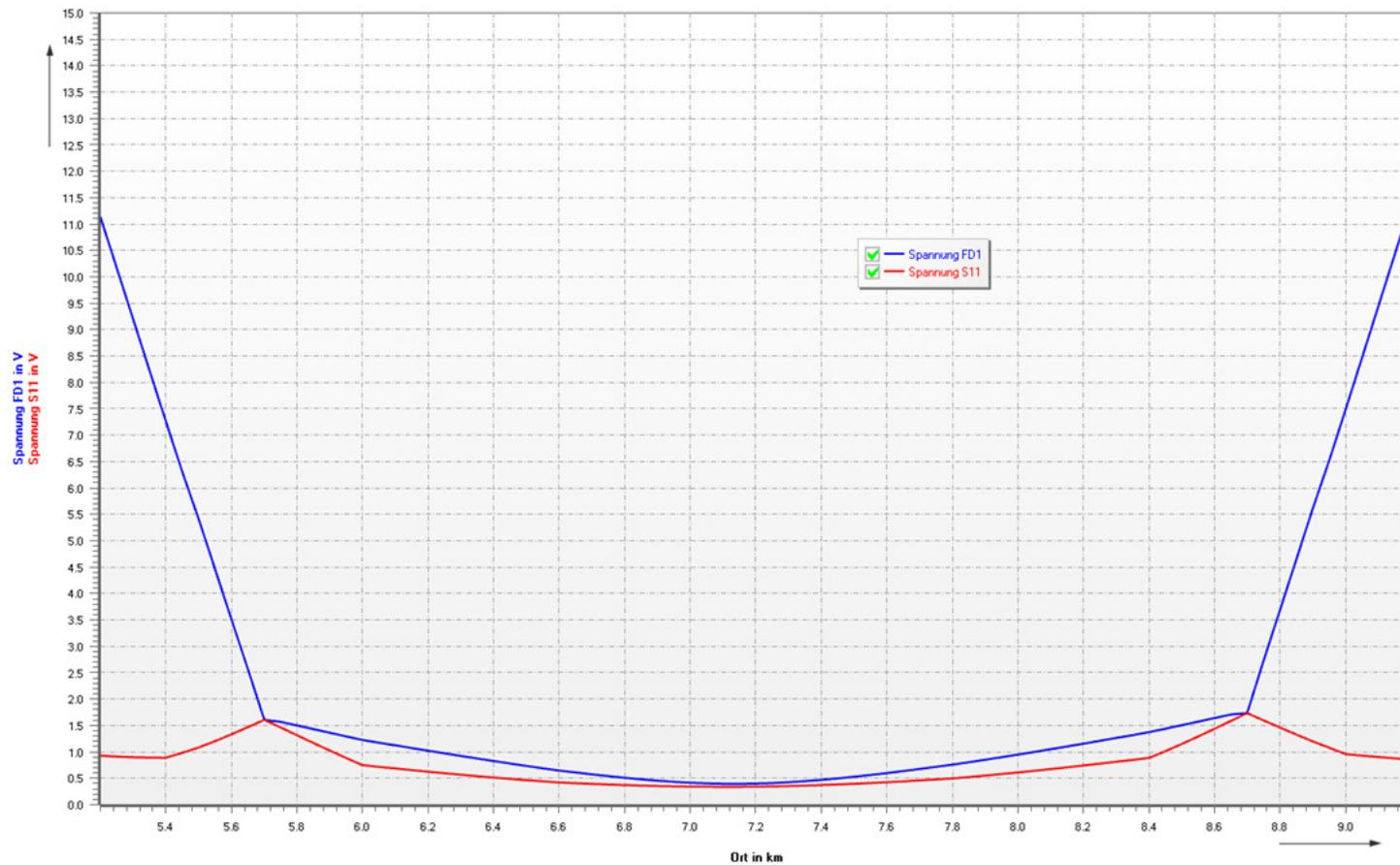
Ortsfunktion der Stromstärken im geerdeten Kettenwerk (FD1) zwischen den Erdungseinrichtungen und in den Kettenwerken (FD2, FD3, FD4) der Betriebsgleise, Betriebsstromstärke je 1 kA, Abstand der Erdungseinrichtungen 3 km, Trassenabstand 200 m

## Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Stromstärken geerdetes Kettenwerk (FD1) und im Rückleitungssystem zwischen den Erdungseinrichtungen, Betriebsstromstärke 3 kA, Abstand der Erdungseinrichtungen 3 km, Trassenabstand 200 m

## Untersuchungsergebnisse



Ortsfunktion der Spannungen im geerdeten Kettenwerk (FD1) und der Schiene 1 Gleis 1 zwischen den Erdungseinrichtungen, Betriebsstromstärke 3 kA, Abstand der Erdungseinrichtungen 3 km, Trassenabstand 200 m

## Untersuchungsergebnisse

### Szenarium B4 – viergleisig, zwei Erdungseinrichtungen zugewandtes Gleis, Betriebsströme Nachbartrasse

Tabelle 6: Maximale Körperspannung und Stromstärke im zweiseitig geerdeten Kettenwerk Gleis 2 (viergleisige Strecke)

Abstand der Erdungseinrichtungen in m	Gleis-Trassen-Mittenabstand	maximale Körperspannung $U_{b,max}$ in V	Stromstärke im geerdeten Kettenwerk in A
<b>1 500</b>	4 m	1,10	253
	10 m	0,67	167
	20 m	0,51	132
	30 m	0,51	132
	50 m	0,50	132
	100 m	0,50	132
	200 m	0,49	132
	<b>2 000</b>	4 m	1,07
10 m		0,65	167
20 m		0,49	132
30 m		0,49	132
50 m		0,49	132
100 m		0,49	132
200 m		0,48	132
<b>3 000</b>		4 m	1,14
	10 m	0,71	168
	20 m	0,55	133
	30 m	0,55	133
	50 m	0,55	133
	100 m	0,55	133
	200 m	0,54	132

## 4 Untersuchungen zum Tiefener Tunnel

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

Der Terfener Tunnel ist Teil der Neubaustrecke der Unterinntalbahn und befindet sich zwischen Baumkirchen und Stans.

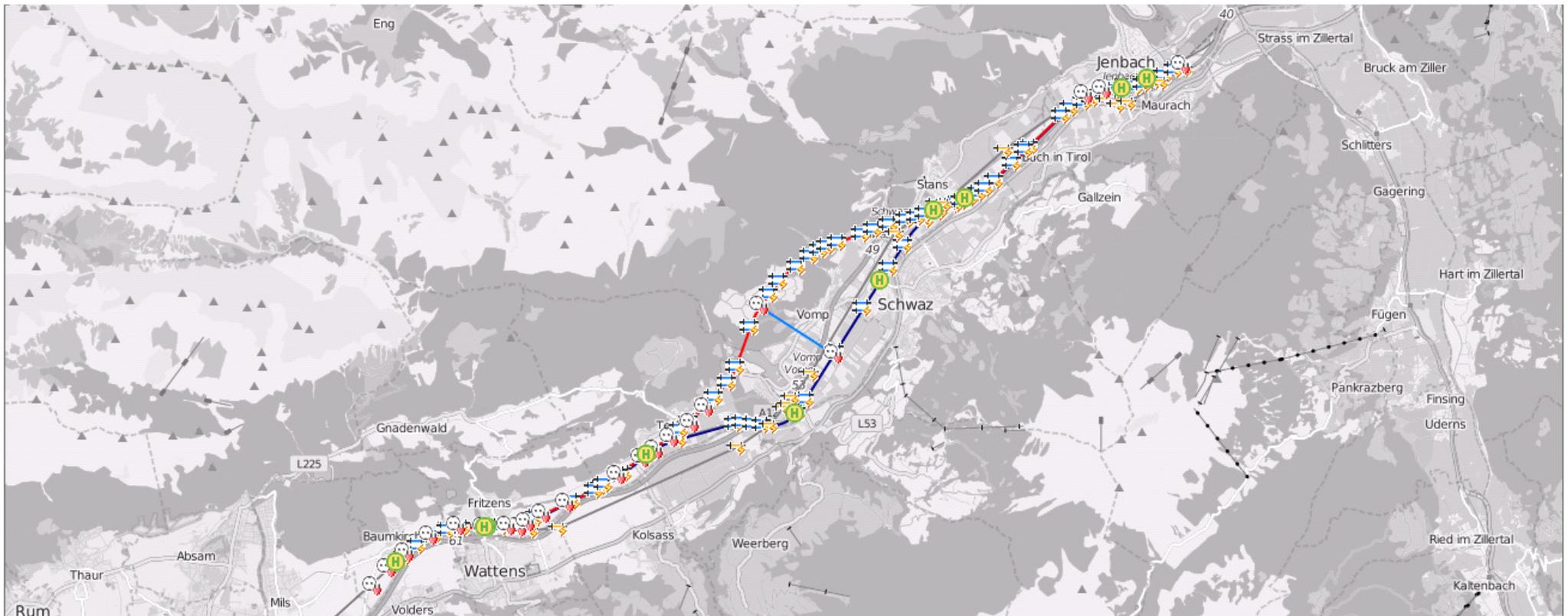
Der Terfener Tunnel hat eine Länge von rund 18 km, teilweise besteht er aus Galerien, die in unmittelbarer Nachbarschaft zur Bestandsstrecke verlaufen.

Eine galvanische Verbindung im Rückleitungssystem zwischen Neubaustrecke und Bestandsstrecke besteht an den Tunnelportalen.

Der am weitesten von der Bestandsstrecke entfernte Teil der Neubaustrecke befindet sich zwischen den Haltepunkten Terfens-Weer und Stans mit einer Länge von 9,25 km.

Der Gleisachsenabstand der Inntal-Bestandsstrecke zur Neubautunnelstrecke variiert im Abstand sehr stark. Der maximale Abstand beträgt 1,9 km.

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel



## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

Im Terfener Tunnel auf der Unterinntalbahn wurden bei **Havarieübungen beim Einhängen von Erdungsstangen** elektrische Ausgleichsvorgänge (Lichtbögen) an den Stangen festgestellt.

Es war grundsätzlich zu prüfen, ob im konkreten Fall die elektrische Sicherheit für das Personal (z. B. Feuerwehren) gewährleistet ist.

Für den Havariefall verfügt der Tunnel über drei festinstallierte Erdungsanlagen, und zwar an beiden Tunnelmündern und unsymmetrisch im Tunnel an einer Überleitstelle.

Beim **Einhängen einer Erdungsstange** im Tunnel entfernt von den Erdungsanlagen wurde ein **Ableitstrom zwischen Oberleitung und Gleis** durch die Erdungsstange bei geschlossenen Erdungsschaltern festgestellt.

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

Rückströme aus der Bestandsstrecke können über vorhandene galvanische Verbindungen in die Rückleitung der NBS und über die Erdungsschalter auch in deren Fahrleitung gelangen. Durch induktive Kopplung entstehen Längsspannungen, die in den Maschen des Rückleitungssystems auch Stromflüsse verursachen.

Beim **Einlegen der Erdungsstange entsteht eine neue Masche** in diesem Rückleitungsnetz, welches sich durch einen **Ausgleichsstrom durch die Erdungsstange** bemerkbar macht.

Im Rahmen der Untersuchungen war zu prüfen und rechnerisch nachzuweisen, wie es in einem geerdeten Oberleitungssystem beim Einhängen einer Erdungsstange zu Stromflüssen kommen kann und welche Gefährdungen (**Höhe der Stromstärke, Höhe der Spannungen, Lichtbogenzündung**) entstehen.

Es war zu belegen, dass die elektrische Sicherheit hinsichtlich der zulässigen Berührungsspannungen gegeben ist.

Unter Verwendung des beschriebenen Algorithmus wird der Terfener Tunnel in Abschnitte geteilt, für die eine feste Entfernung zur Bestandsstrecke Inntal angenommen werden kann.

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

Szenarium T1 – nur stationäre Erdungseinrichtungen an den Portalen

Die fest installierten Erdungsanlagen an den Portalen werden in das Modell einbezogen.

Auf der Neubaustrecke werden keine Belastungen angenommen.

Als Belastung auf der Stammstrecke wird angenommen, dass sich am Unterwerk Fritzens-Wattens eine Gesamtfahrleitungsstromstärke von 1 000 A jeweils in beiden Richtungen eingespeist wird.

Er fällt bis zum Tunnelportal Baumkirchen auf eine Stromstärke von 500 A. Am Unterwerk Münster wird in Richtung Fritzens-Wattens eine Gesamtfahrleitungsstromstärke von 750 A eingespeist.

Beim Bahnhof Schwaz sollen als Tiefpunkt der Belastung mit einer Stromstärke von etwa 200 A in der Fahrleitung fließen.

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

Szenarium T1 – nur stationäre Erdungseinrichtungen an den Portalen

An den Rettungsschächten NA23 und NA48 des Feuerwehreinsatzes ist die Spannung zwischen der Fahrleitung und dem Gleis zu bestimmen.

Es ist nachzuweisen, dass sich keine unzulässigen Berührungsspannungen ausbilden.

Es ist zu prüfen, ob diese Spannung ausreicht, einen Lichtbogen aufrecht zu erhalten.

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

### Szenarien T2, T3 und T4

Ausgehend vom Modell des Szenariums T1 wird am Rettungsschacht NA 23 (T2) oder NA48 (T3) und bei beiden NA (T4) des Feuerwehreinsatzes Erdungseinrichtungen modelliert.

Diese Erdungseinrichtungen werden die Stromaufteilung im Erdungssystem definitiv verändern.

Dieser Zustand wird berechnet und neben den sich ausbildenden Spannungen und Strömen im geerdeten Fahrleitungssystem besonderes Augenmerk auf den Strom in den Erdungseinrichtungen gelegt.

Es ist nachzuweisen, dass sich keine unzulässigen Berührungsspannungen ausbilden und ein Lichtbogen nicht bestehen bleiben kann.

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

Es wurde ein Netzmodell für die Strecke aufgestellt, welches folgende Kilometrierungen verwendet:

km 00,000	Tunnelportal Baumkirchen
km 02,800	Unterwerk Fritzens-Wattens
km 04,000	Notausstieg NA48
km 05,300	Notausstieg NA23
km 15,800	Tunnelportal Stans
km 21,000	Unterwerk Münster

In den Voruntersuchungen wurde die gewünschte Streckenbelastung angenähert eingestellt.

Das erfolgte durch unterschiedliche Streckenlasten auf den Abschnitten Tunnelportal Baumkirchen - Unterwerk Fritzens-Wattens und Unterwerk Fritzens-Wattens - Unterwerk Münster.

:

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

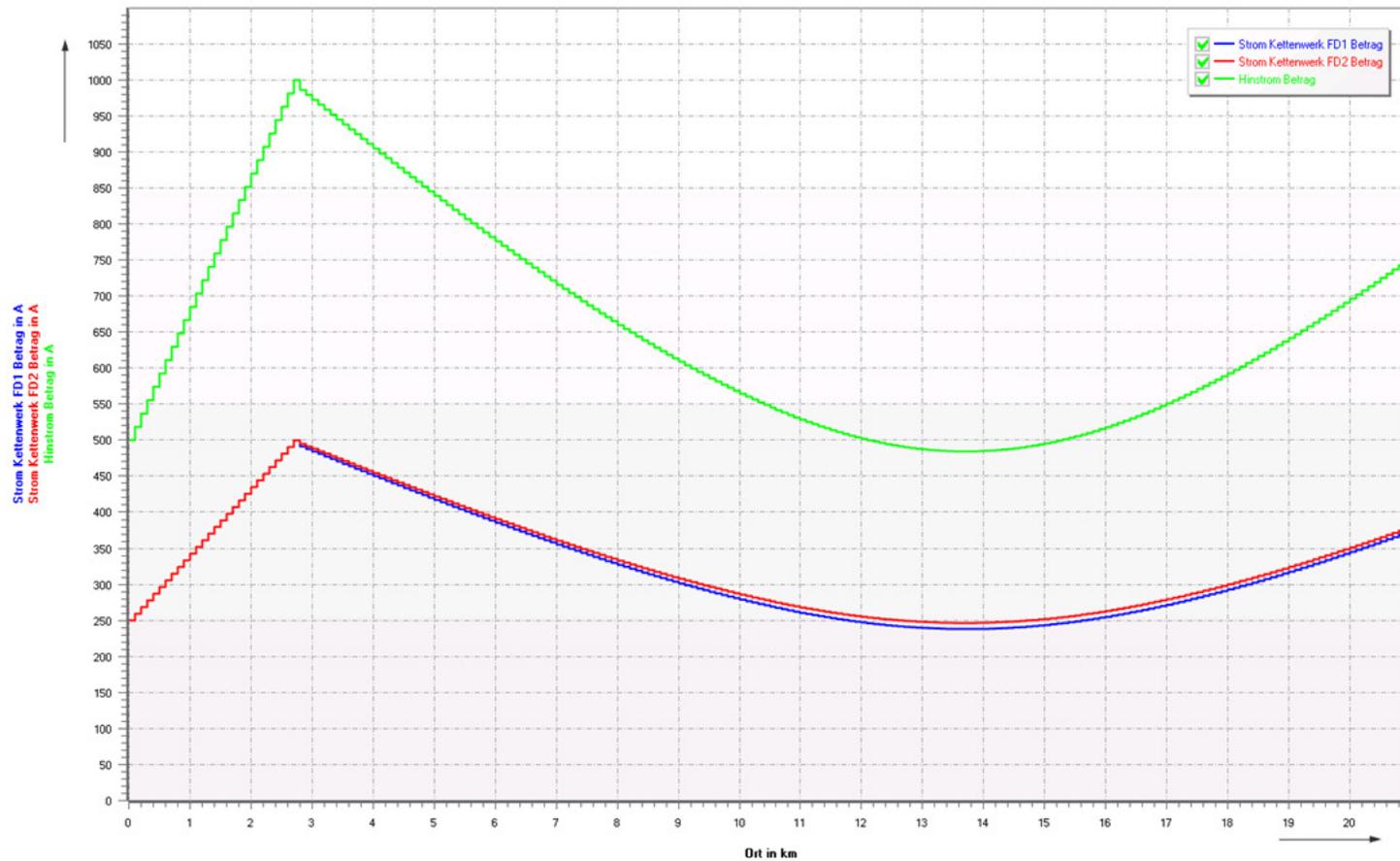
Während es möglich war die Belastungsverhältnisse in ersten Abschnitt wegen der einseitigen Speisung im Modell nach Vorgabe zu modellieren, konnte im Falle Fritzens-Wattens – Münster nur die Höhe der Stromstärke an den Einspeisepunkten nachgebildet werden.

Wegen der zweiseitigen Speisung bestimmen die Impedanzverhältnisse und die Höhe der Einspeisespannungen der Unterwerke die Lastaufteilung.

So ergab sich nach langwieriger Iteration ein Stromstärkeminimum am km 13,75 Nahe Autobahnauffahrt Schwaz, 1,1 km östlicher als die Vorgabe Bahnhof Schwaz, mit einer Stromstärke von 484,3 A.

Der gewünschte Minimalwert von 200 A war nicht einstellbar. Im Sinne einer worst-case-Betrachtung wurde diese Einstellung für die Strecke für die nachfolgenden Untersuchungen beibehalten:

# Untersuchungen zum Terfener Tunnel



Ortsfunktion der Stromstärken der Hinleiter (Summe) und Kettewerke (FD1, FD2) der Stammstrecke im Bereich des Terfener Tunnels

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

Szenarium T1 – nur stationäre Erdungseinrichtungen an den Portalen

Die Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen des Terfener Tunnels sind wirksam.

Das hat zur Folge, dass nun in den Kettenwerken und in den Rückleitungssystemen Kreisströme fließen, die durch die von außen induzierten Spannungen angetrieben werden.

Die Stromstärken betragen 11,2 A bzw. 29,4 A.

Die Unterschiede erklären sich aus der unterschiedlichen geometrischen Lage der geerdeten Kettenwerke zu den induzierenden Fahrleitungen der Bestandsstrecke.

Gleichzeitig ergeben sich im Bereich zwischen den beiden Erdungseinrichtungen Fahrleitungs-Erde-Spannungen, die allerdings keine gefährlichen Körperspannungen sind.

.

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

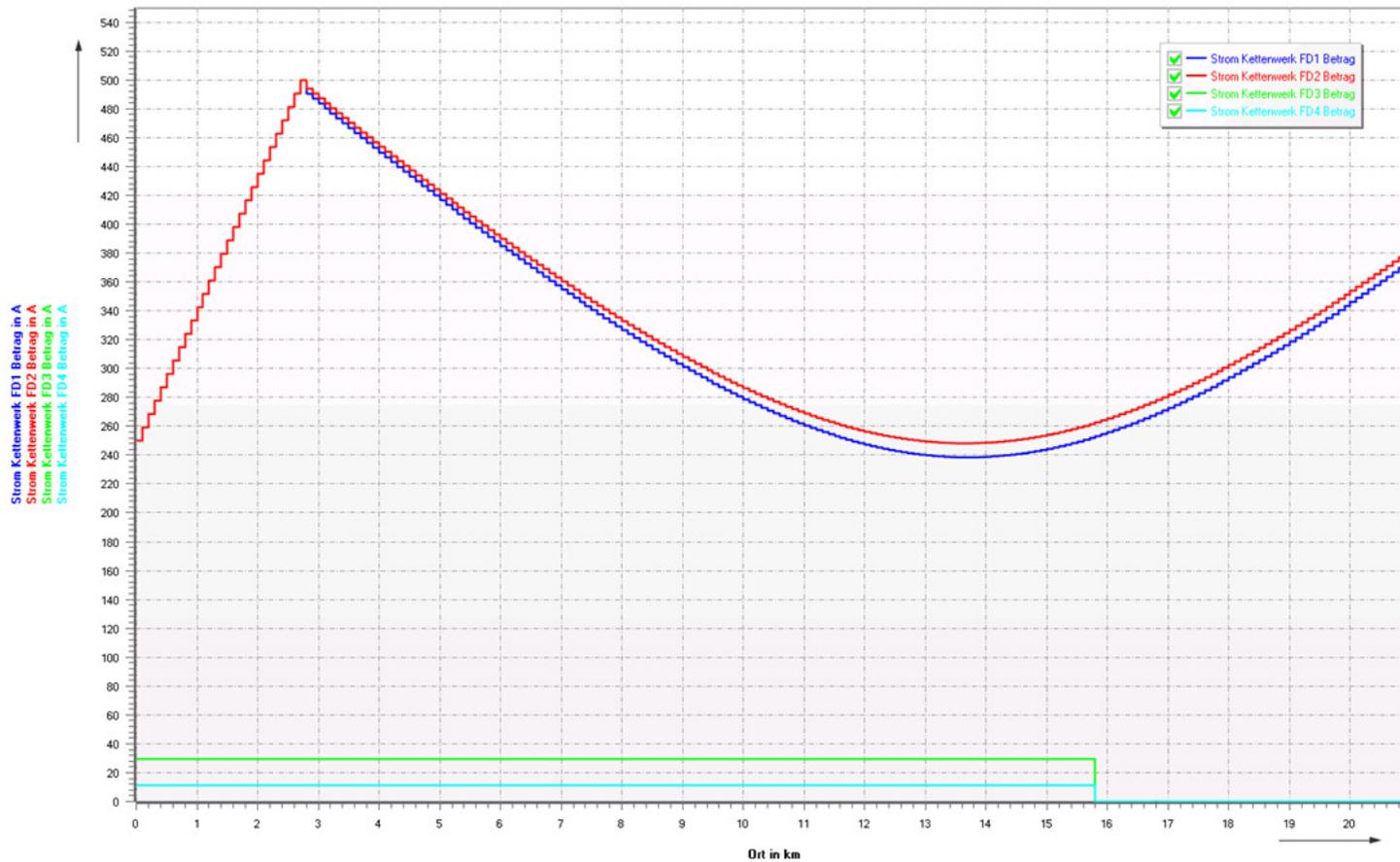
Szenarium T1 – nur stationäre Erdungseinrichtungen an den Portalen

Die Maximalwerte der Fahrdrabt-Gleis-Spannungen betragen 28,2 V und 14,9 V und treten in der Nähe des Unterwerks Fritzens-Wattens auf.

Für die Ausbildung des Maximums spielen die hohen beeinflussenden Stromstärken (ca. 1000 A) und der Erdausbreitungswiderstand des Unterwerks-Maschen-Erders die bestimmende Rolle.

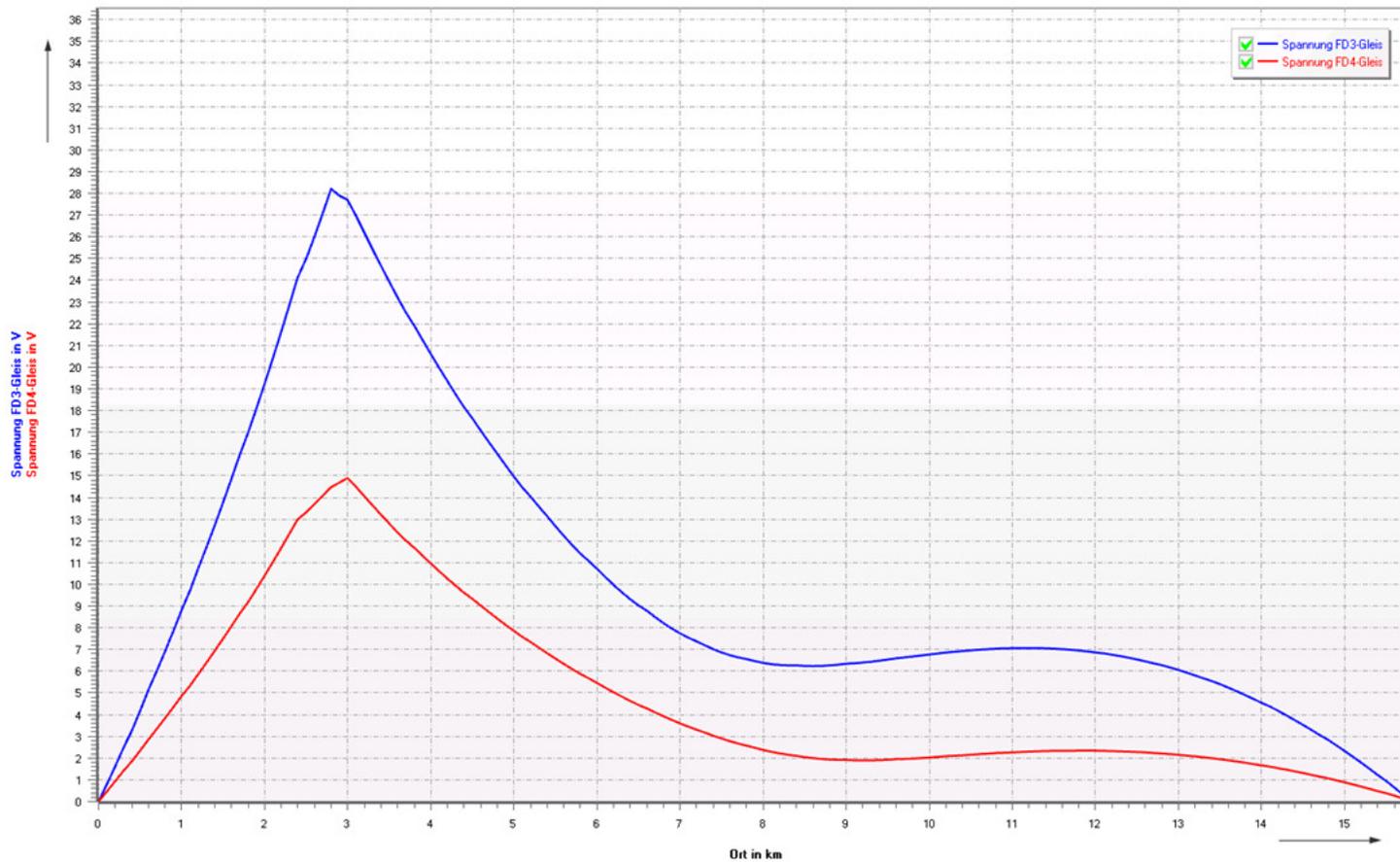
Die Höhe der Spannungen ist in einer Größe, die es nicht erwarten lässt, dass ein gezündeter Lichtbogen bestehen bleibt. Die Brennspannung eines Lichtbogens erfordert einen höheren Spannungsbedarf.

# Untersuchungen zum Terfener Tunnel



Ortsfunktion der Stromstärken der Kettewerke (FD3, FD4) im Terfener Tunnel bei wirksamen Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen und Stromstärken der Kettewerke (FD1, FD2) der Stammstrecke

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel



Ortsfunktion der Fahrdrabt-Gleis-Spannungen der geerdeten Kettenwerke (FD3, FD4) im Terfener Tunnel bei wirksamen Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

Szenarium T2 – stationäre Erdungseinrichtungen an den Portalen, Erdungsstange an NA48

Einlegen einer Erdungsstange am Kettenwerk 3 am **Notausstieg NA48 (km 04,000)** des Terfener Tunnels

Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen wirksam

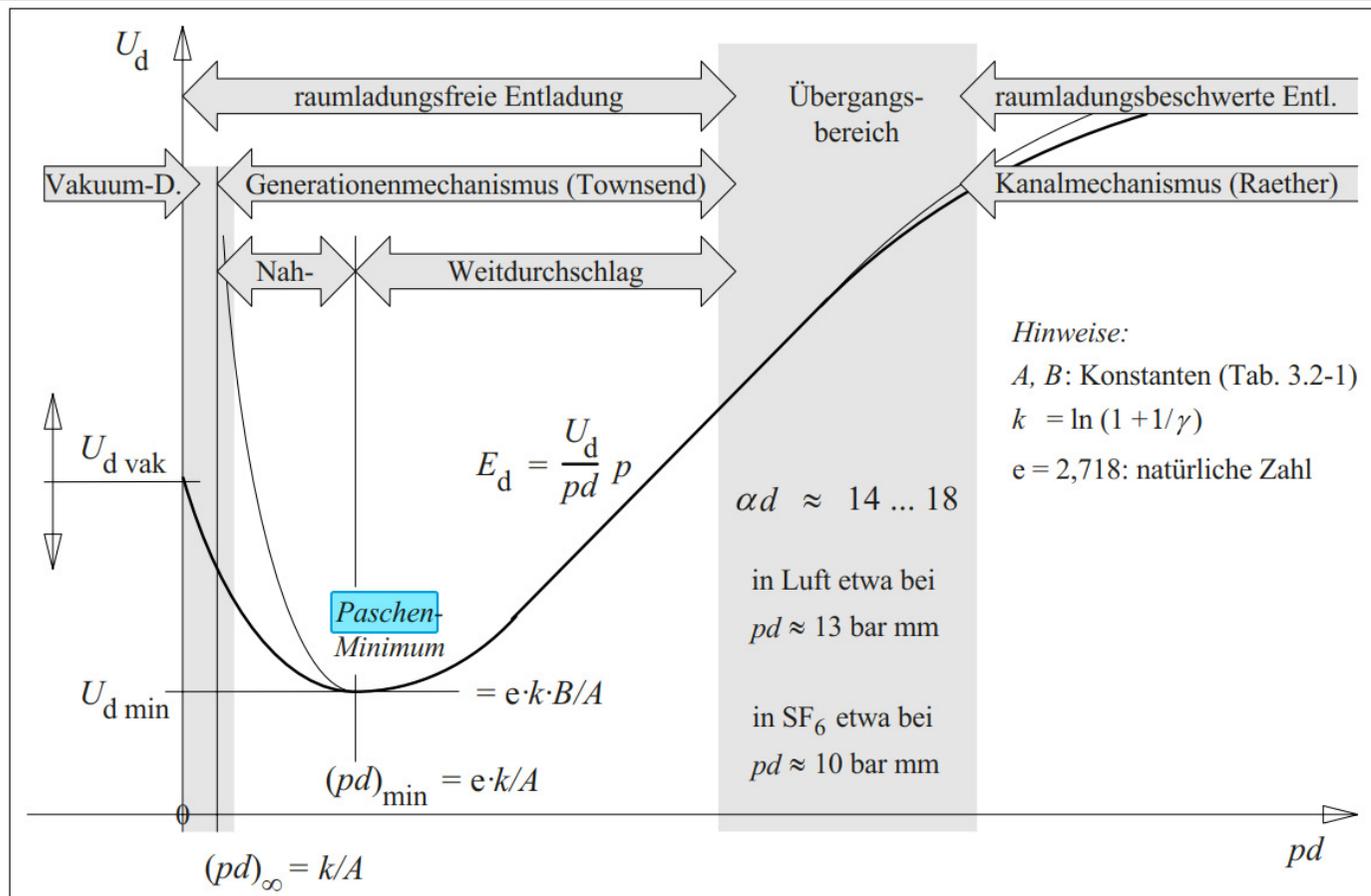
Im betrachteten Kettenwerk wird die bisher von den Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen gebildete Schleife in zwei Schleifen aufgelöst.

Über die eingelegte Erdungseinrichtung fließt ein Strom mit der Stromstärke von 47,8 A. Dieser Strom wurde gewissermaßen mittels der Erdungsstange „eingeschaltet“. Beim Einlegen → große Stromänderung in kürzester Zeit und mit den wirksamen Induktivitäten der Strombahn eine hohe induzierte Spannung

$$U_{ind} = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

führt zu einem Überschlag bzw. einem Lichtbogen (Zündkennlinie des Lichtbogens = PASCHEN-Gesetz).

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel



Gesetz von Paschen als analytisch bestimmte Näherungsfunktion (dünn gezeichnete Kurve) und als realer Verlauf (stärker ausgezogene Kurve)

$$U_{d \min \text{ Luft}} = 330 \text{ V} \dots 350 \text{ V} \text{ bei } 7,3 \text{ bar} \cdot \mu\text{m}$$

$$U_{d \min \text{ SF}_6} = 507 \text{ V} \text{ bei } 3,5 \text{ bar} \cdot \mu\text{m}$$

Quelle: Prof. Andreas Küchler  
 Hochspannungstechnik  
 ISBN 978-3-662-54699-4

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

Szenarium T2 – stationäre Erdungseinrichtungen an den Portalen, Erdungsstange an NA48

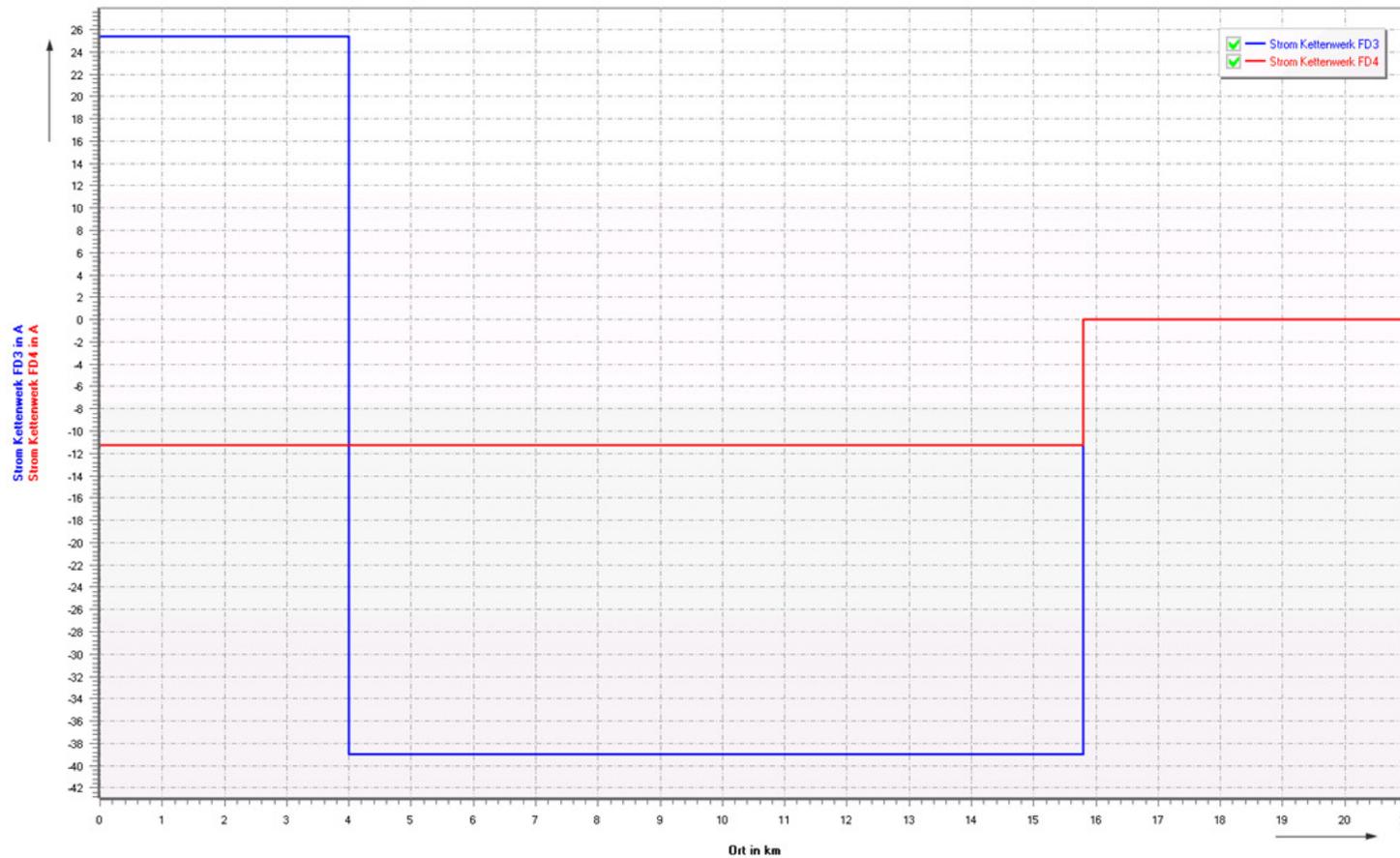
Ein Lichtbogen kann sich aber wegen der zu geringen Brennspannung nicht ausbilden.

Die Kettenwerks-Gleis-Spannung an der Stelle der eingelegten Erdungseinrichtung geht auf 0 V zurück.

Im anderen Gleis, wo keine Erdungseinrichtung eingelegt ist, verringert sich die Kettenwerks-Gleis-Spannung praktisch nicht.

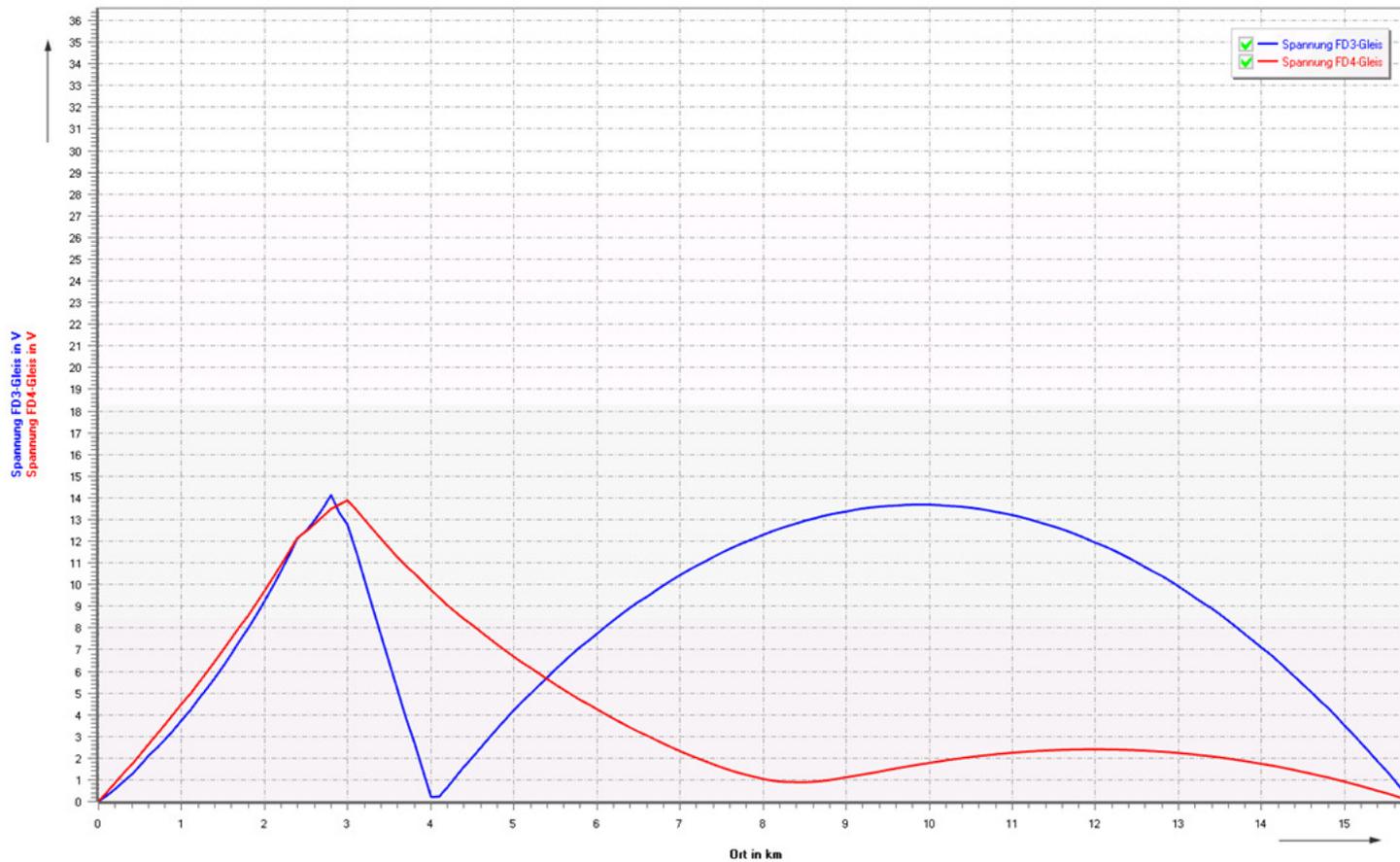
Die Kettenwerks-Gleis-Spannungen sind auch hier nicht als gefährlichen Körperspannungen einzustufen.

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel



Ortsfunktion der Stromstärken der Kettenwerke (FD3, FD4) im Terfener Tunnel bei wirksamen Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen und einer eingleisig eingelegten Erdungseinrichtung am NA48

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel



Ortsfunktion der Fahrdrabt-Gleis-Spannungen der geerdeten Kettenwerke (FD3, FD4) im Terfener Tunnel bei wirksamen Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen und einer eingleisig eingelegten Erdungseinrichtung am NA48

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

Szenarium T3 – stationäre Erdungseinrichtungen an den Portalen, Erdungsstange an NA23

Einlegen einer Erdungsstange am Kettenwerk 3 am **Notausstieg NA23 (km 05,300)** des Terfener Tunnels

Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen wirksam

Im betrachteten Kettenwerk wird die bisher von den Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen gebildete Schleife in zwei Schleifen aufgelöst.

Über die eingelegte Erdungseinrichtung fließt ein Strom mit der Stromstärke von 27,0 A.

Dieser Strom wurde mittels der Erdungsstange eingeschaltet.

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

Szenarium T3 – stationäre Erdungseinrichtungen an den Portalen, Erdungsstange an NA23

Auch hier sehr große Stromänderung in kürzester Zeit und eine hohe induzierte Spannung mit Überschlag bzw. Lichtbogen

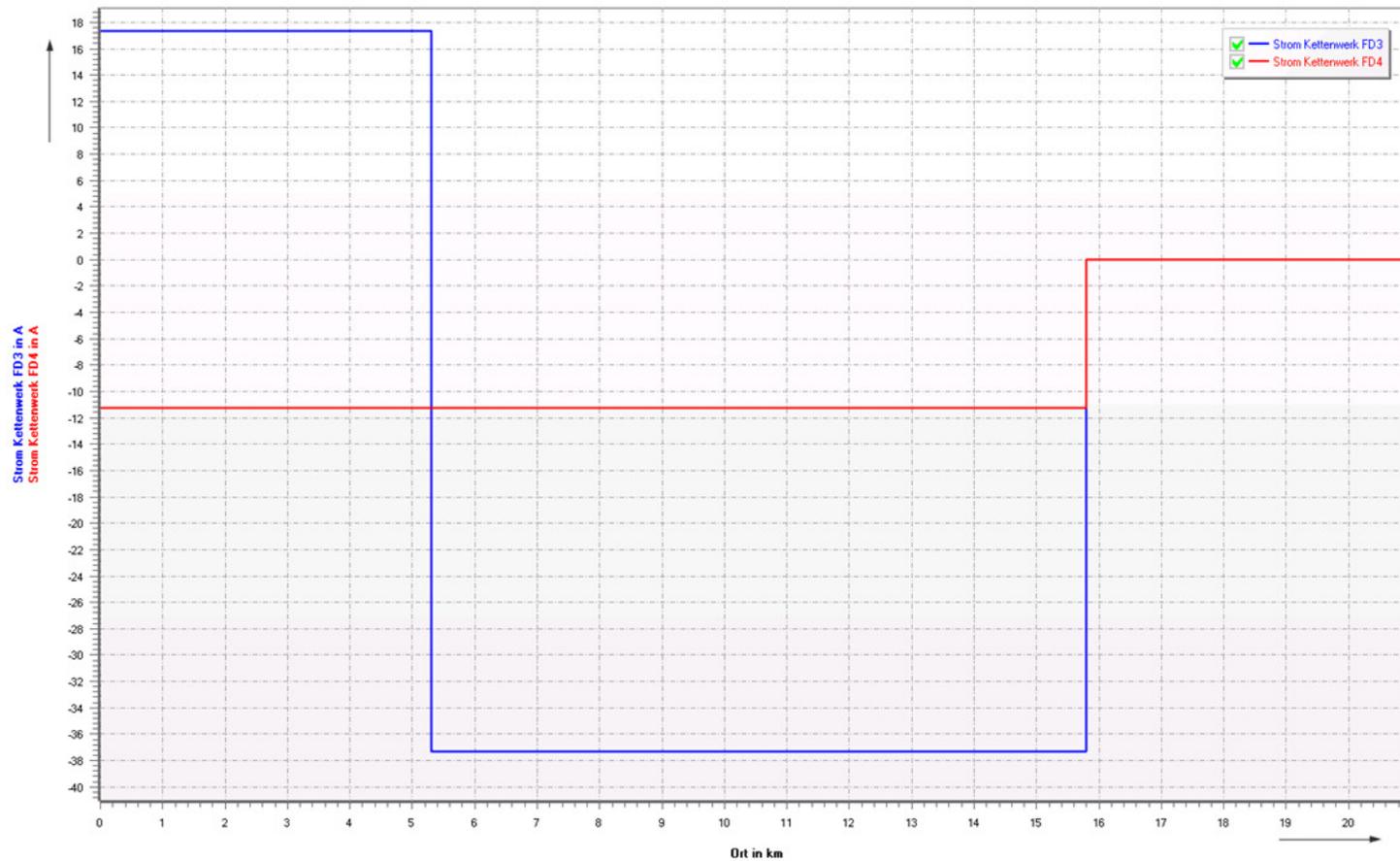
Lichtbogen kann sich aber wegen der zu geringen Brennspannung nicht ausbilden.

Die Kettenwerks-Gleis-Spannung an der Stelle der eingelegten Erdungseinrichtung geht auf 0 V zurück.

Im anderen Gleis, wo keine Erdungseinrichtung eingelegt ist, verringert sich die Kettenwerks-Gleis-Spannung praktisch nicht.

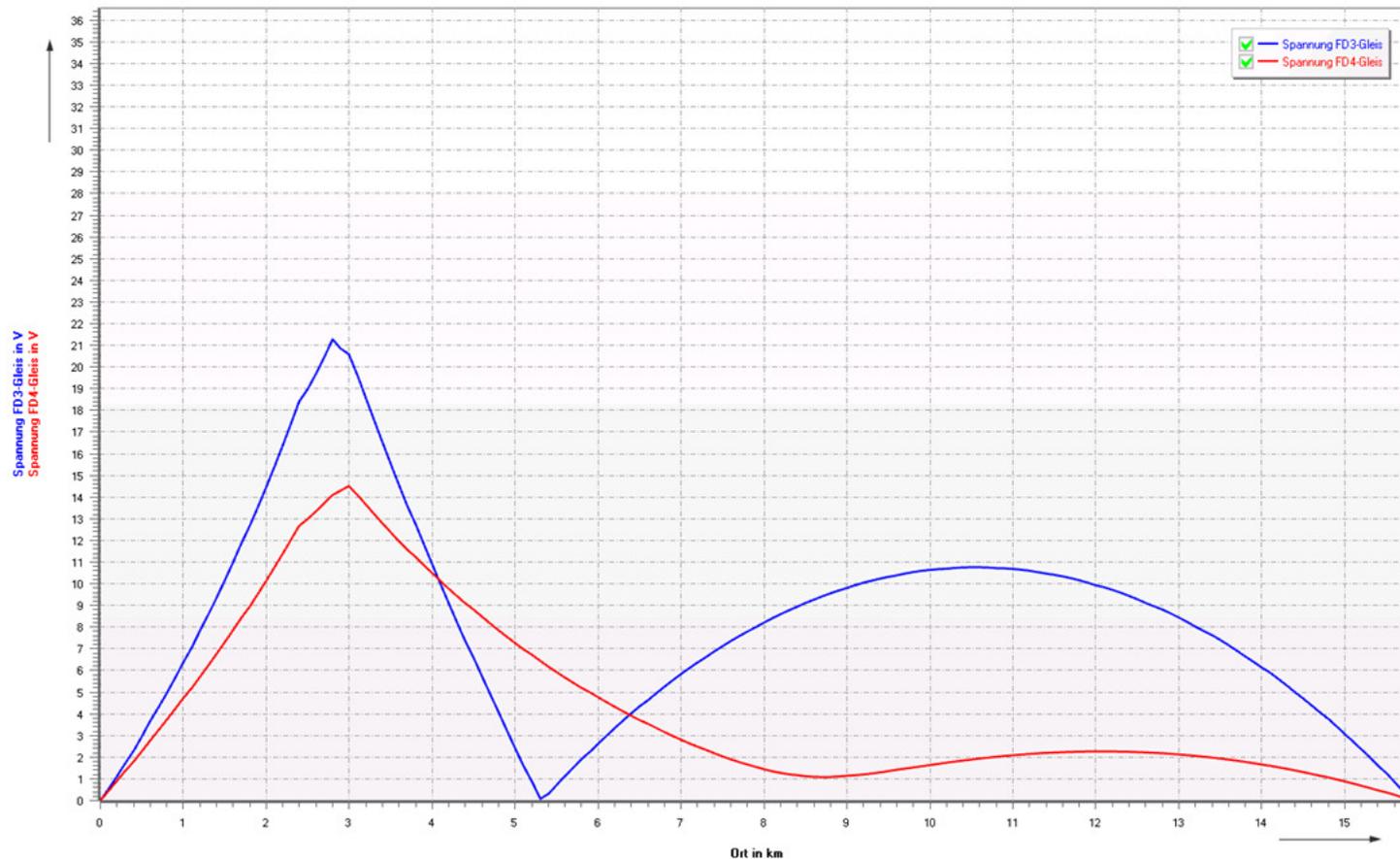
Die Kettenwerks-Gleis-Spannungen sind auch hier nicht als gefährlichen Körperspannungen einzustufen.

# Untersuchungen zum Terfener Tunnel



Ortsfunktion der Stromstärken der Kettenwerke (FD3, FD4) im Terfener Tunnel bei wirksamen Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen und einer eingleisig eingelegten Erdungseinrichtung am NA23

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel



Ortsfunktion der Fahrdrabt-Gleis-Spannungen der geerdeten Kettenwerke (FD3, FD4) im Terfener Tunnel bei wirksamen Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen und einer eingleisig eingelegten Erdungseinrichtung am NA23

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

Szenarium T4 – stationäre Erdungseinrichtungen an den Portalen, Erdungsstange an NA48 und NA23

Einlegen einer Erdungsstange am Kettenwerk 3 am **Notausstieg NA48 (km 04,000) und am Notausstieg NA23 (km 05,300)** des Terfener Tunnels

Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen wirksam

Im betrachteten Kettenwerk wird die bisher von den Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen gebildete Schleife in zwei Schleifen aufgelöst.

Über die eingelegte Erdungseinrichtung fließt ein Ströme mit den Stromstärken von 72,0 A (NA48) und 30,4 A (NA23) .

Diese Ströme wurde mittels der Erdungsstangen eingeschaltet.

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel

---

Szenarium T4 – stationäre Erdungseinrichtungen an den Portalen, Erdungsstange an NA48 und NA23

Auch hier sehr große Stromänderung in kürzester Zeit und eine hohe induzierte Spannung mit Überschlag bzw. Lichtbogen

Lichtbogen kann sich aber wegen der zu geringen Brennspannung nicht ausbilden.

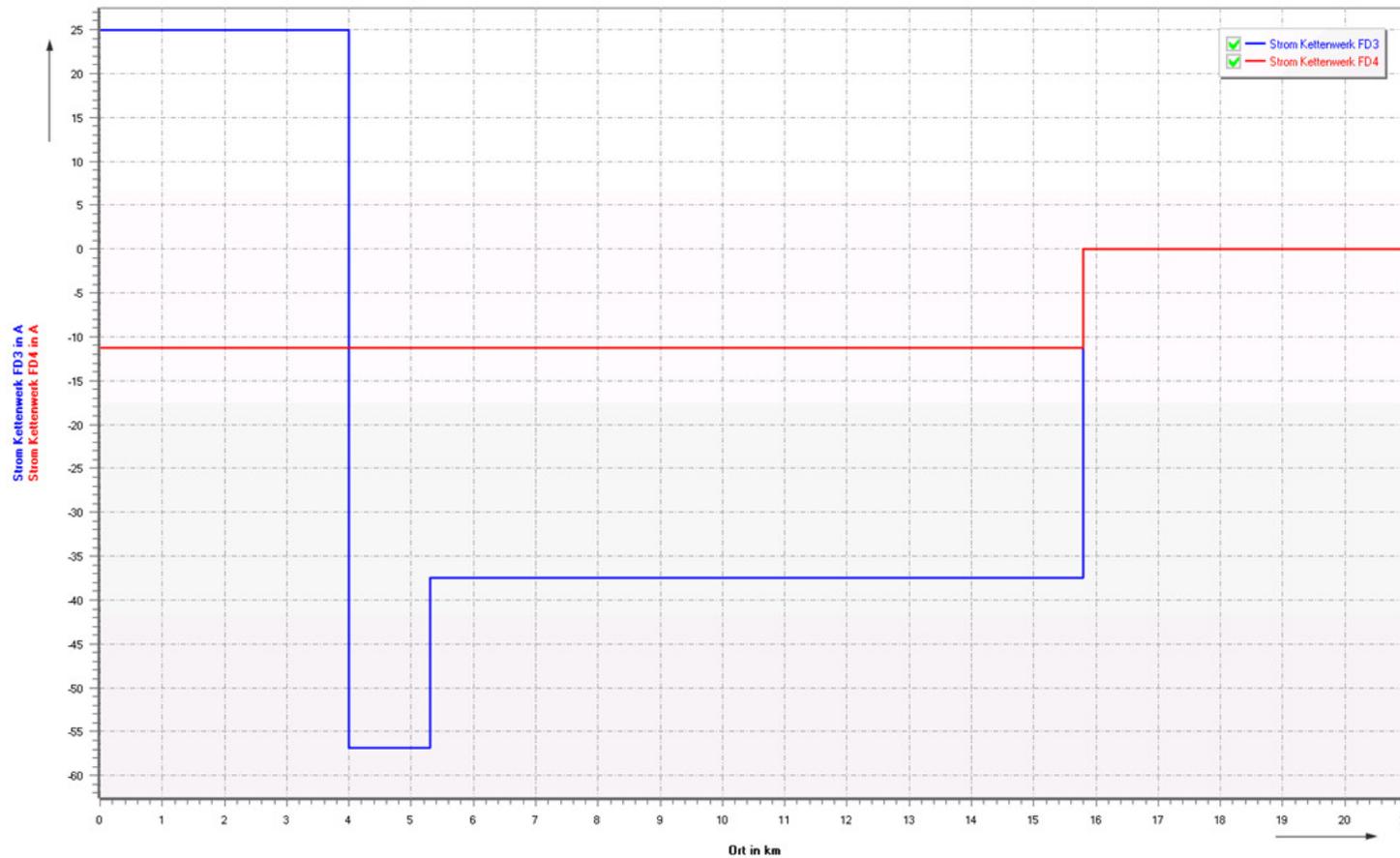
Die Kettenwerks-Gleis-Spannung an der Stelle der eingelegten Erdungseinrichtung geht auf 0 V zurück.

Im anderen Gleis, wo keine Erdungseinrichtung eingelegt ist, verringert sich die Kettenwerks-Gleis-Spannung praktisch nicht.

Die Kettenwerks-Gleis-Spannungen sind auch hier nicht als gefährlichen Körperspannungen einzustufen.

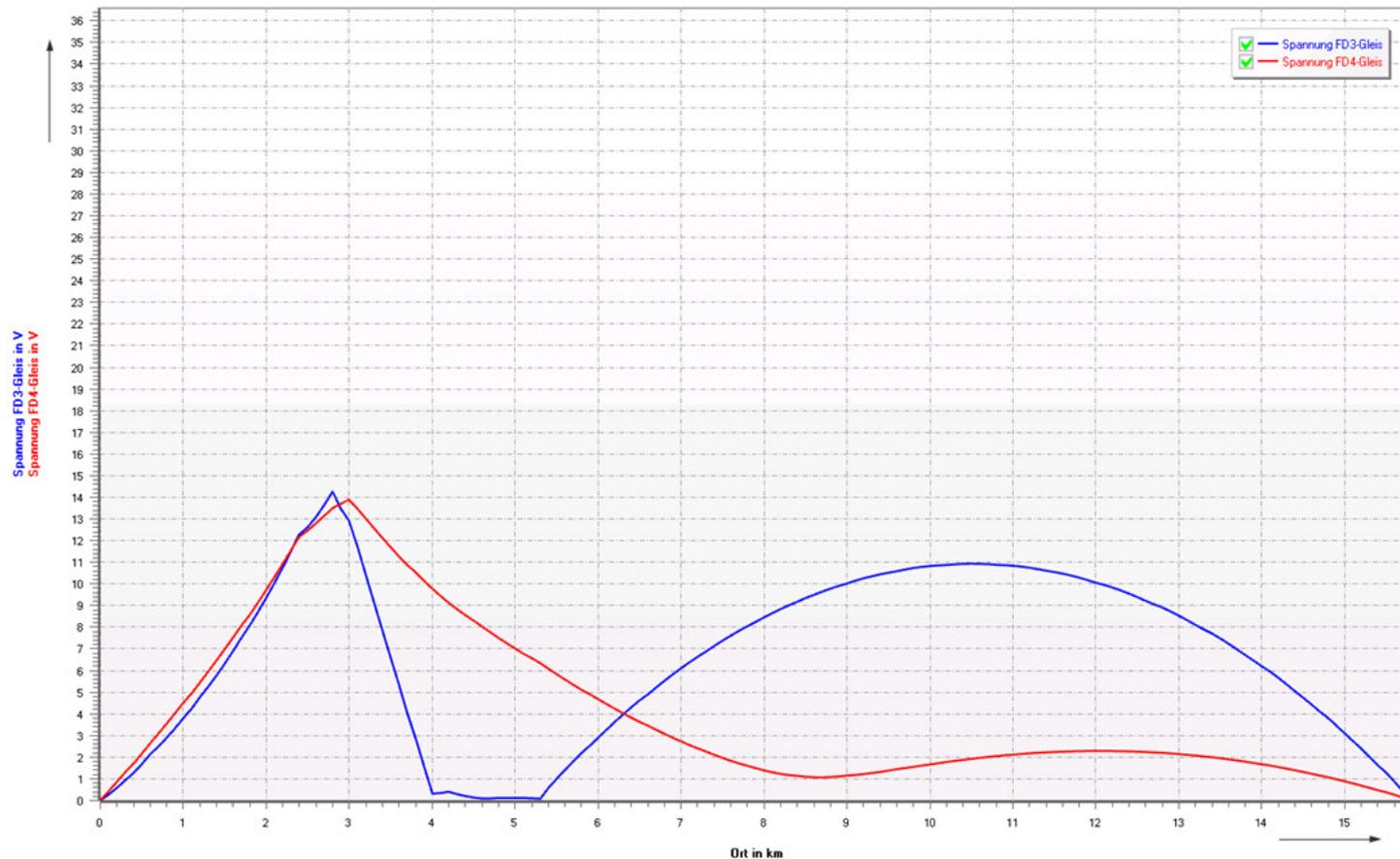
Der Bereich zwischen den beiden eingelegten Erdungseinrichtungen durch sehr geringe Kettenwerks-Erde-Spannungen (kleiner 0,5 V) gekennzeichnet.

## Untersuchungen zum Terfener Tunnel



Ortsfunktion der Stromstärken der Kettenwerke (FD3, FD4) im Terfener Tunnel bei wirksamen Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen und zwei eingleisig eingelegten Erdungseinrichtung am NA23 und am NA48

# Untersuchungen zum Terfener Tunnel



Ortsfunktion der Fahrdrabt-Gleis-Spannungen der geerdeten Kettenwerke (FD3, FD4) im Terfener Tunnel bei wirksamen Erdungseinrichtungen an den Tunnelportalen und zwei eingleisig eingelegten Erdungseinrichtung am NA23 und am NA48

## 5 Zusammenfassung

## Zusammenfassung

---

Erdungseinrichtungen, welche die Arbeitsstelle von beiden Seiten her absichern, bieten auch bei Kurzschlussströmen von 30 kA und elektrischem Eisenbahnbetrieb auf parallelen Strecken ausreichend Schutz gegen gefährliche Körperspannungen.

Der Schutz in Richtung der speisenden Quelle ist nur eingeschränkt gegeben.

Er hängt stark von dem Einbauort der Erdungseinrichtung ab und kann durch eine mit der Erdungseinrichtung verbundene Gleis-Vermaschung auf einen Bereich von etwa 60 m in Richtung der speisenden Quelle gesichert werden.

Durch die mit der Erdungseinrichtung verbundene Gleis-Vermaschung kann auf der abgewandten Seite der Bereich von 200 m auch bei Kurzschlussstromstärken von 30 kA garantiert werden.

## Zusammenfassung

---

Für die Verhältnisse am Terfener Tunnel ergibt sich, dass in der geerdeten Anlage die Zündung von Lichtbögen bei Einlegen zusätzlicher Erdungseinrichtungen infolge von der Bestandsstrecke herrührender induzierter Längsspannungen möglich ist.

Entsprechende Beobachtungen der Feuerwehren können bestätigt werden.

Die berechneten Kettenwerks-Gleis-Spannungen stellen jedoch weder unzulässige Körperspannungen dar, noch sind sie in der Lage gezündete Lichtbögen dauerhaft brennen zu lassen.

Die Erdungsanlage ist daher korrekt konzipiert und für die Rettungsverhältnisse geeignet.

Es wird eine ausreichende Schulung der Feuerwehren in Bezug auf die auftretenden Effekte empfohlen.

**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!**

