

Technische Voraussetzungen für den Einsatz von Hochspannungskabeln in elektrischen Netzen

Vortrag: Redzo Muratovic

Redzo Muratovic, Ernst Schmautzer, Wolfgang Emmer: Institut für Elektrische Anlagen

Rudolf Woschitz: Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Klemens Reich: Austrian Power Grid

Michael Klein: Wiener Netze

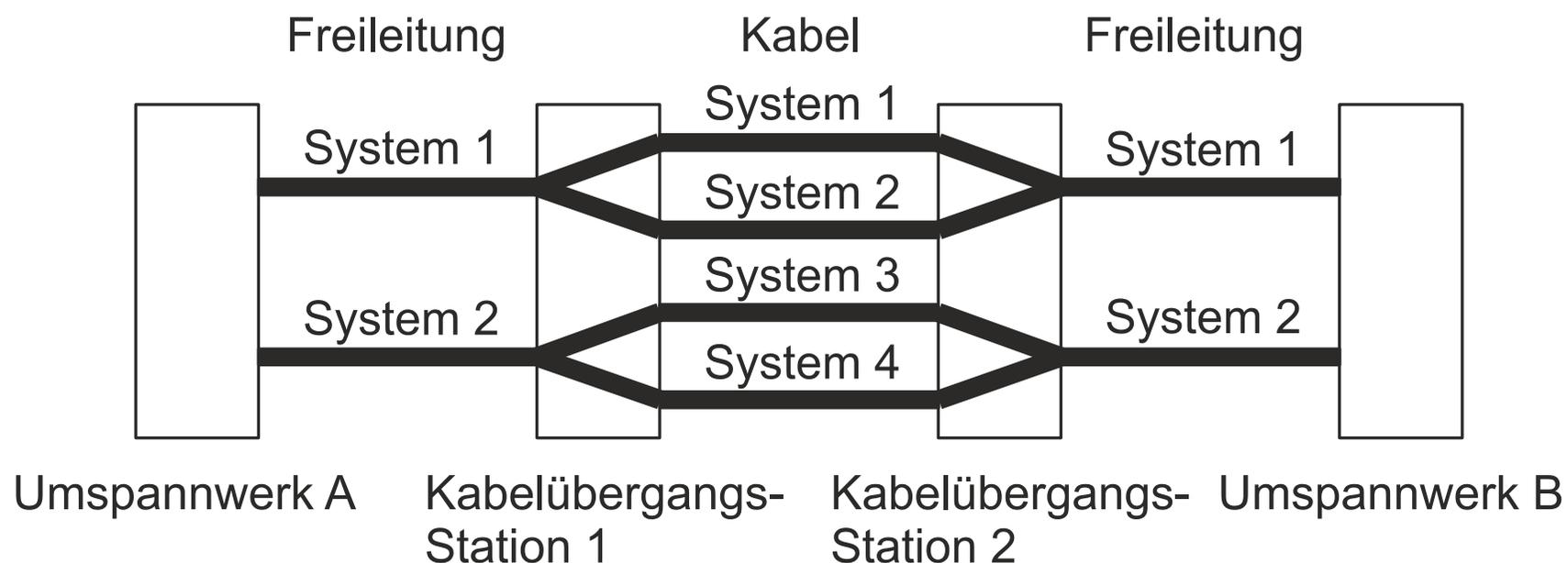
Georg Svejda: Gerichtssachverständiger

12. Februar 2016

AGENDA

- Überblick
- Methode
- Berechnungsergebnisse
 - Crossbonding Fehler
 - Stationäre thermische Betrachtungen
 - Transiente thermische Betrachtungen
 - Ausgangszustand
 - Variation der Erdungswiderstände
 - Erdungskonfigurationen A– B
- Zusammenfassung

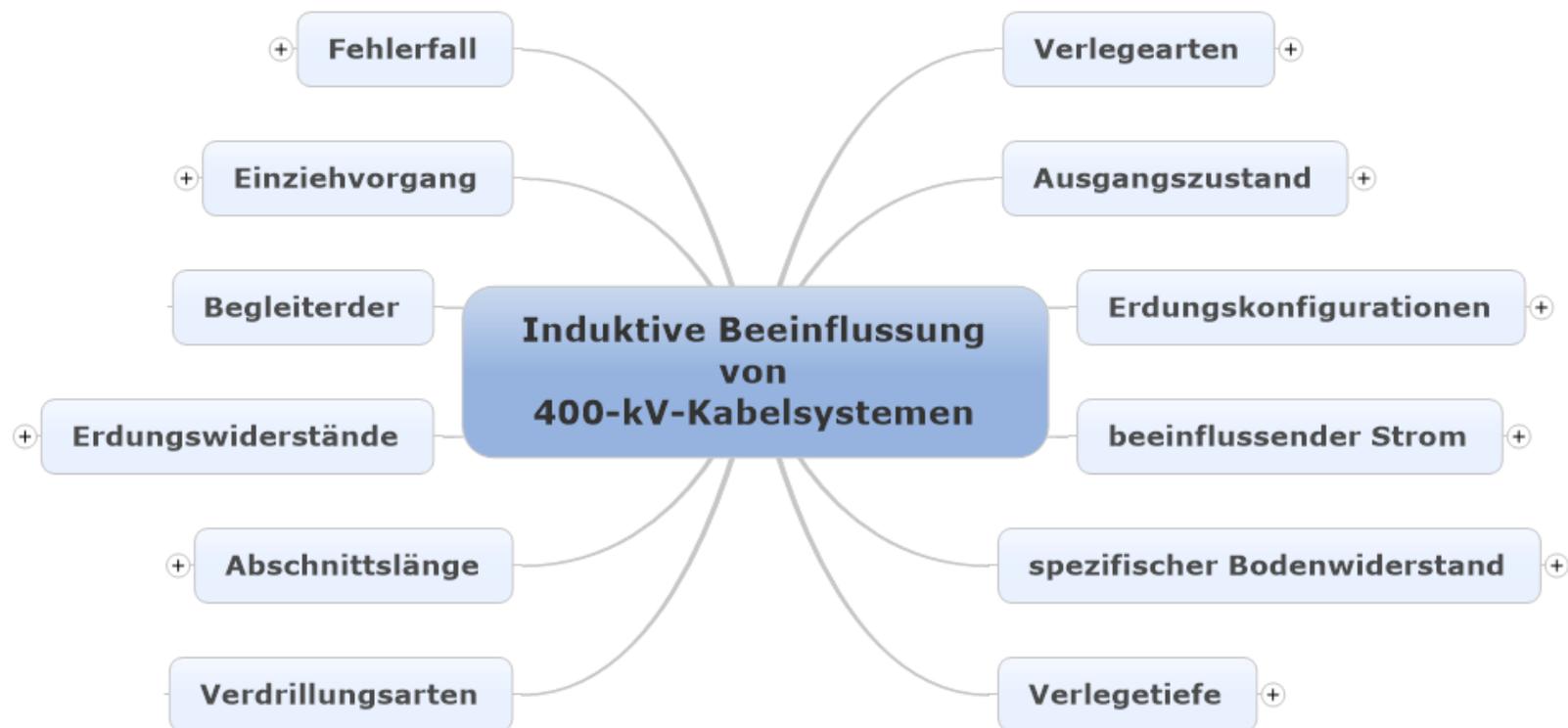
Teilverkabelung



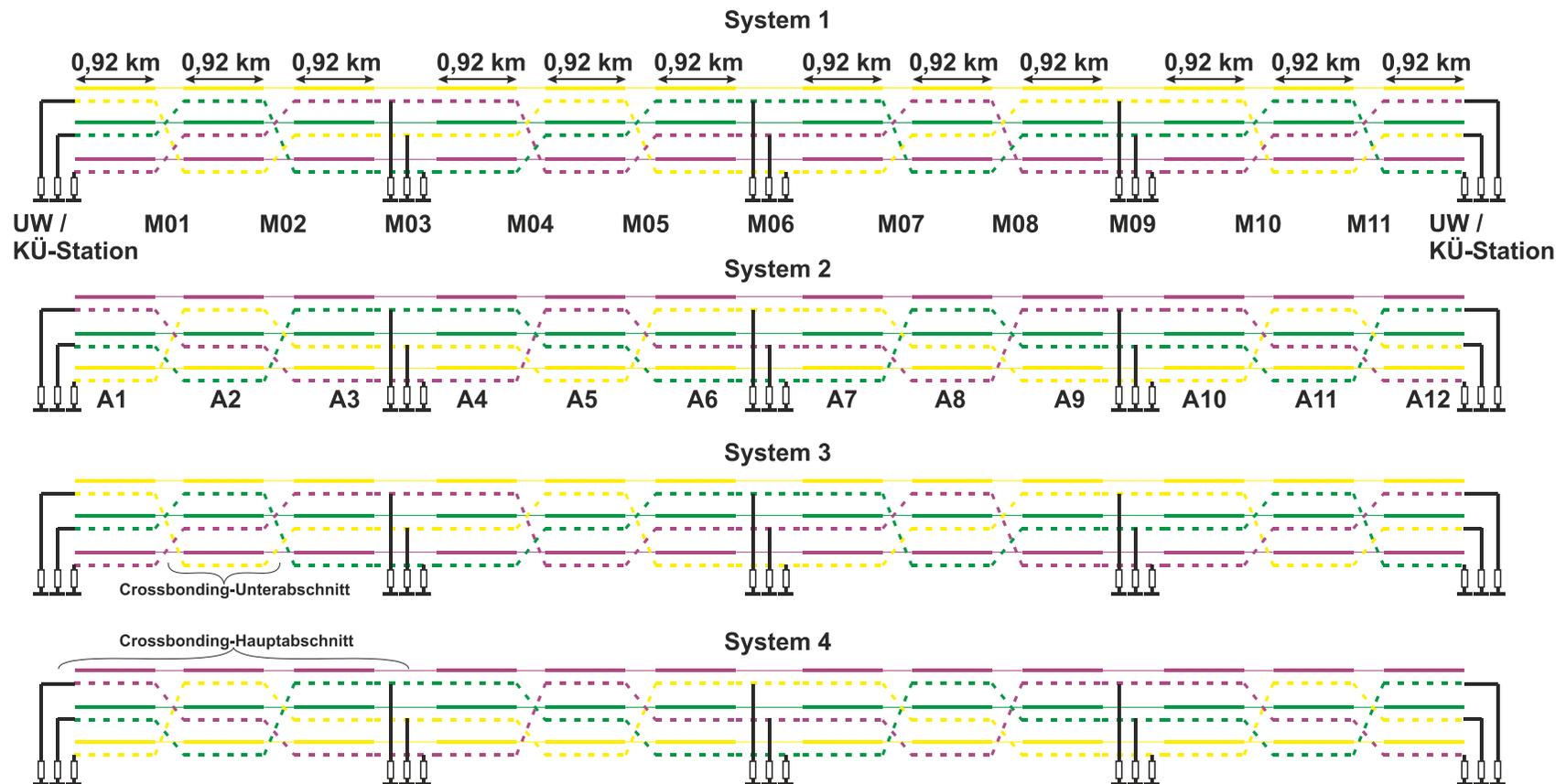
Effekte der Teilverkabelung

- Umgebungsbedingungen von Kabeln führen zu:
 - Höherer Leiteranzahl
 - Höherer Querschnittsfläche
- Reduktion der Impedanz
- Lastflusskonzentration (im vermaschten Übertragungsnetz)
- Gegenmaßnahmen:
 - Impedanzanpassung durch (Serien-)Drosselspulen
 - Schräg- oder Querregler
 - FACTS

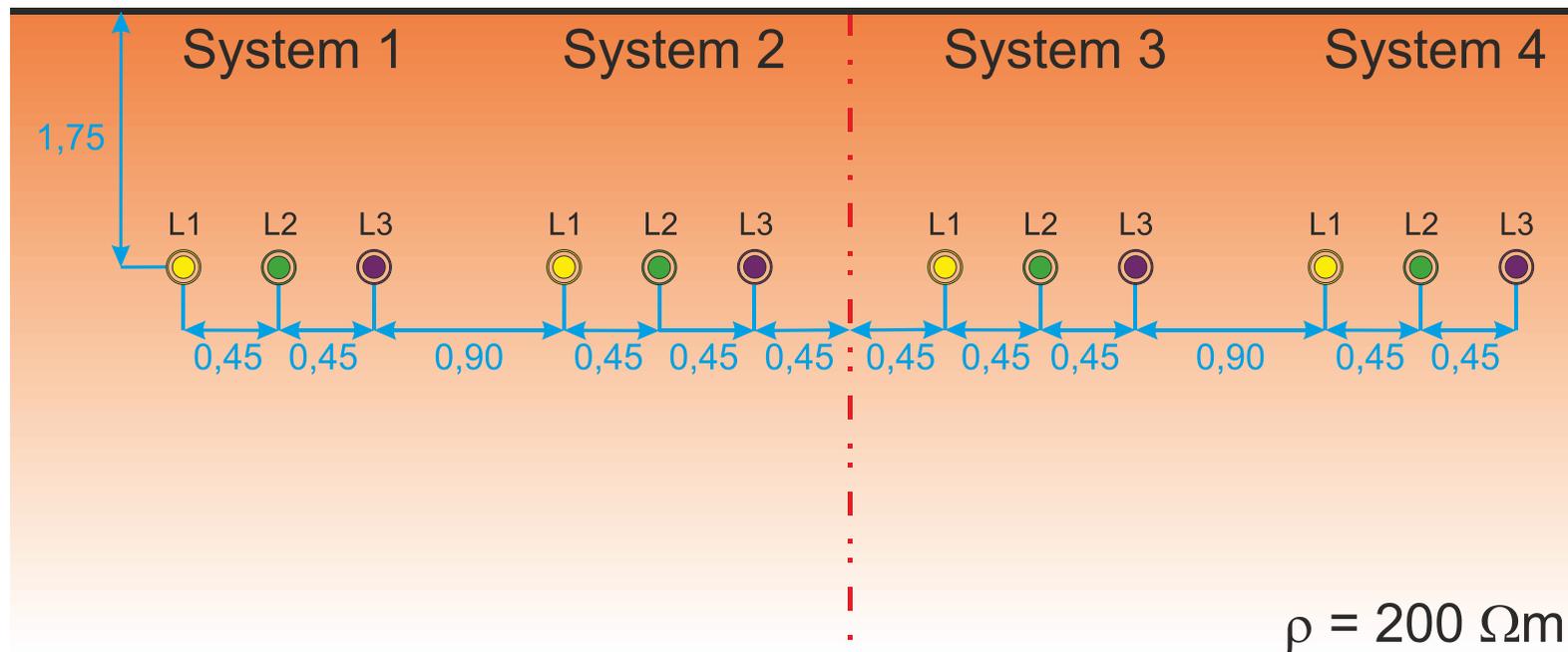
Überblick



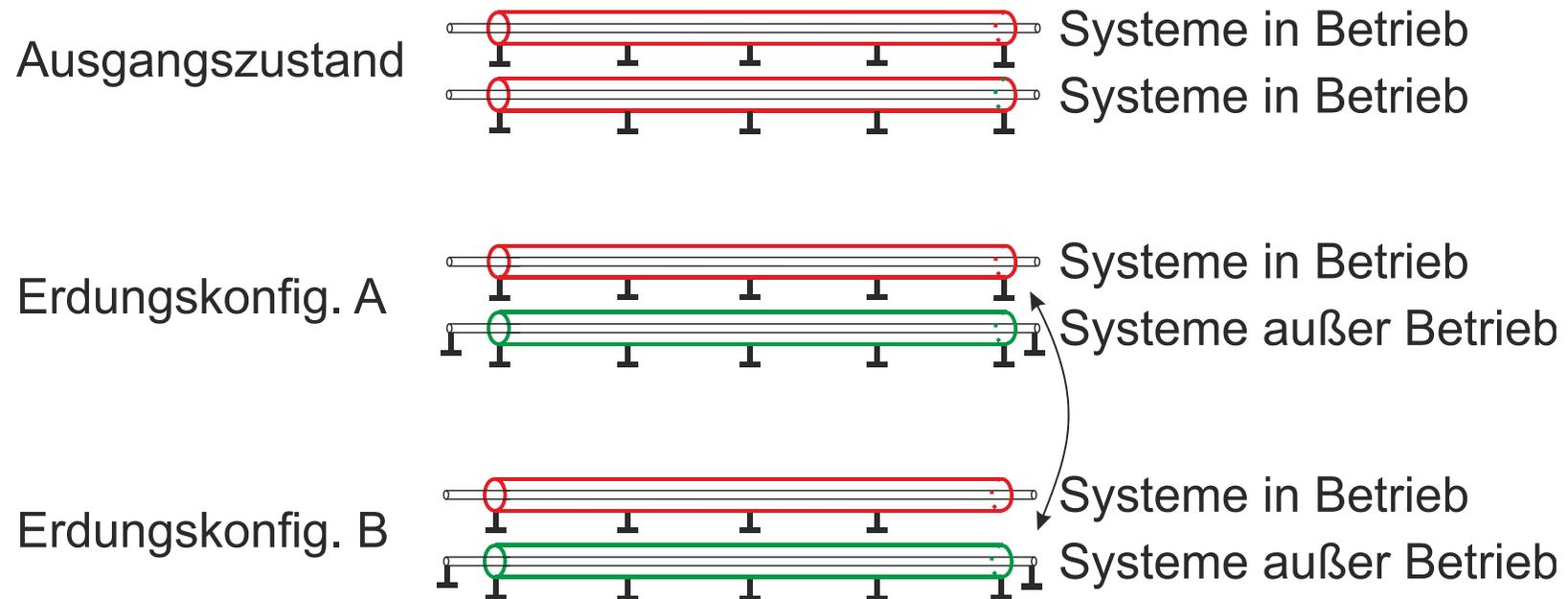
Längs-Verlegeprofil



Quer-Verlegeprofil

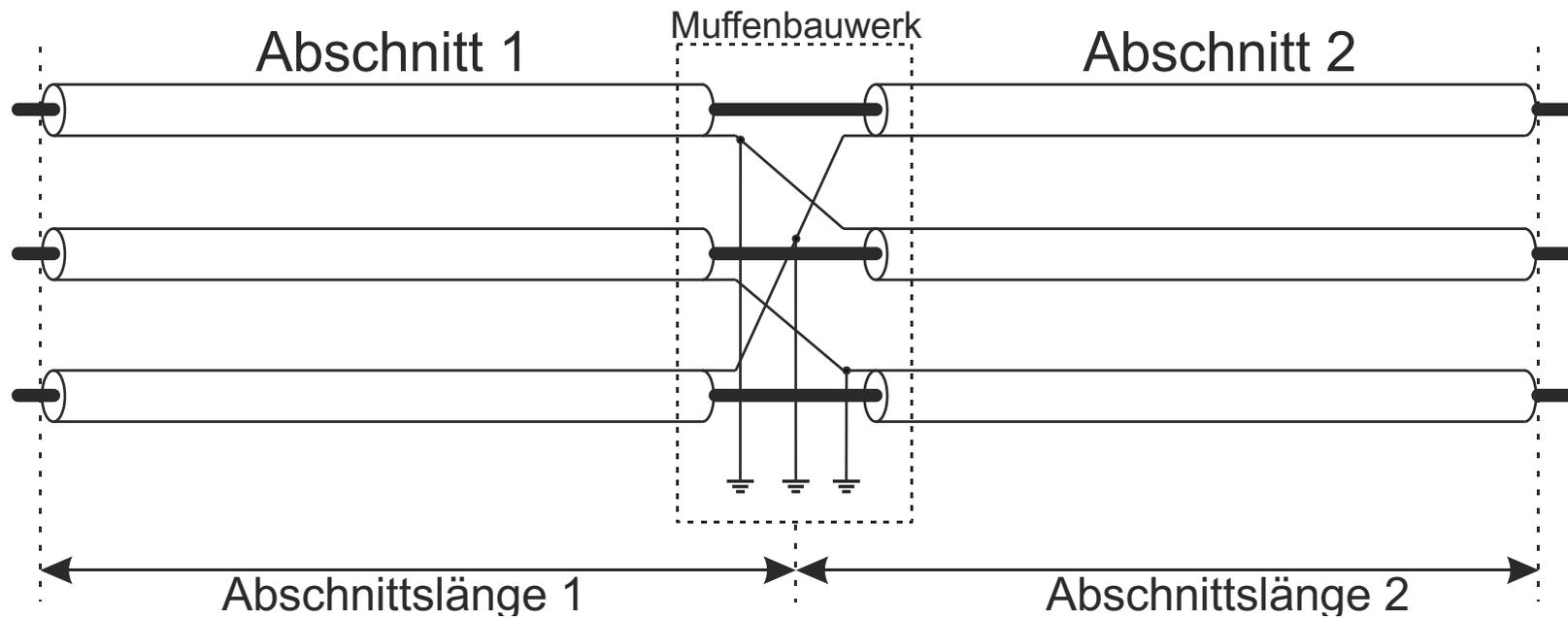


Erdungskonfigurationen

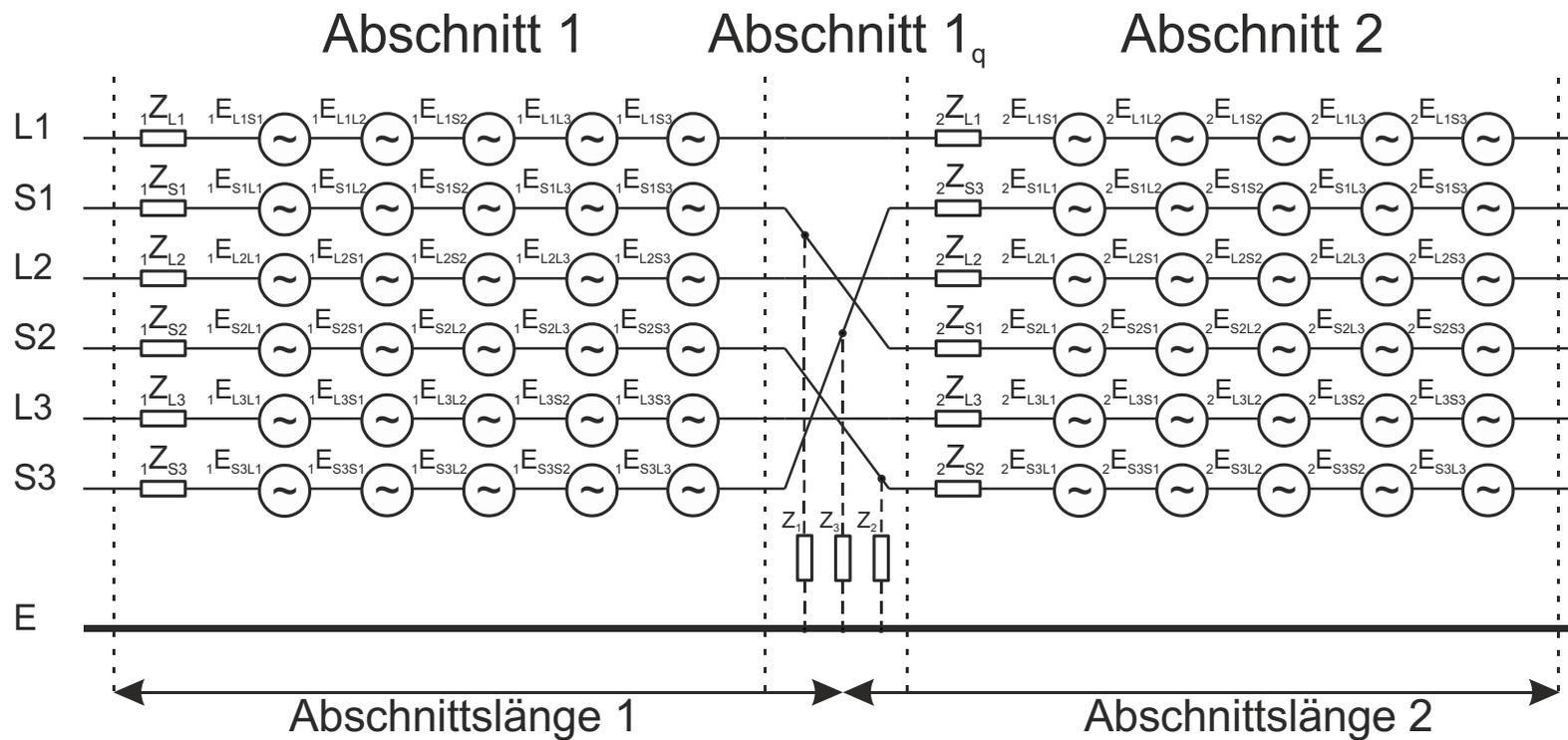


Schematische Abbildung

2 Verdrillungsabschnitte mit Erdung der Kabelschirme

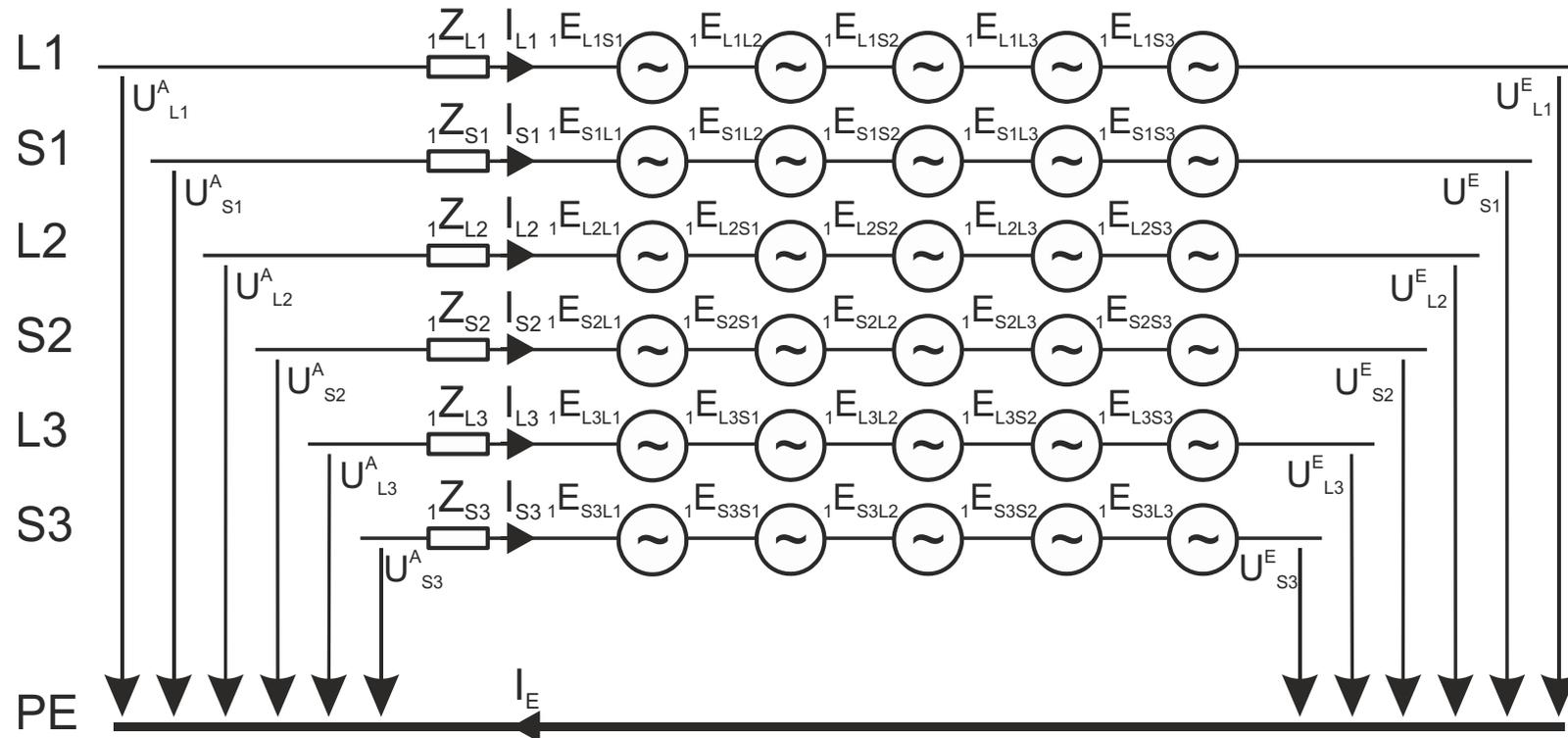


ESB der schematischen Abbildung



- L1 ... Außenleiter 1
- S1 ... Kabelschirm 1
- ${}_1Z_{L1}$... Abschnitt 1, Selbstimpedanz L1
- ${}_1E_{L1S1}$... Abschnitt 1, induzierte Spannung durch S1 auf L1

ESB des Abschnitts 1



Verwendete Formeln

$D_e = \frac{\sqrt{2e}}{\gamma} \delta_E$	äquivalenter Abstand zum Erdrückleiter = Erdstromtiefe in m
f	Frequenz in Hz
h	Höhe des Leiters über dem Erdboden in m
$r_e = \frac{\omega\mu_0}{8}$	Erdwiderstand je Längeneinheit in Ω/m
R	ohmscher Widerstand des Leiters je Längeneinheit in Ω/m
R_i	wirksamer Halbmesser des Leiters in m
$x_{ii} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{D_e}{R_i}$	Selbstreaktanz der Schleife Leiter-Erde je Längeneinheit in Ω/m
$x_{(i)i} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\mu_r}{4}$	innere Reaktanz des Leiters i je Längeneinheit in Ω/m
Z'_{ii}	Selbstimpedanz in Ω/m
$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}}$	in $1/m$
$\gamma = 1,7811$	Besselsche Konstante
$\delta_E = \frac{1,8514}{\alpha}$	Erdstromtiefe bei unendlich langem Leiter in m
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	Induktionskonstante in Vs/Am
μ_r	relative Permeabilität
ρ	spezifischer Bodenwiderstand in Ωm
$\omega = 2\pi f$	Kreisfrequenz in $1/s$

* Vgl. R. Muckenhuber, *Elektrische Anlagen 1, Teil 1*, Vorlesungsunterlagen zur gleichnamigen Vorlesung am Institut für Bau und Betrieb elektrischer Anlagen der TU Graz, 1987, S. 3.1-15

Verwendete Formeln

Koppelimpedanzen

*Näherung nach Dubanton**

$d_{ik} = \sqrt{x_{ik}^2 + (h_i - h_k)^2}$	Distanz zwischen den gekoppelten Leitern in m
f	Frequenz in Hz
h_i	Höhe des induzierenden Leiters in m
h_k	Höhe des induzierten Leiters in m
$\underline{\rho}$	komplexe Erdstromtiefe in m
x_{ik}	horizontale Distanz zwischen den gekoppelten Leitern in m
\underline{Z}'_{ik}	Koppelimpedanz in Ω/m
$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}}$	in $1/m$
$\delta_E = \frac{1,8514}{\alpha}$	Erdstromtiefe bei unendlich langem Leiter in m
$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$	Induktionskonstante in Vs/Am
ρ	spezifischer Bodenwiderstand in Ωm
Legende	Kreisfrequenz in $1/s$

* Dietrich Oeding and Bernd R. Oswald, *Elektrische Kraftwerke und Netze*, 6th ed. Heidelberg, Deutschland: Springer-Verlag, 2004, S. 277

Matrixgleichung - Längsspannungsabfälle

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{L1}^A - \underline{U}_{L1}^E \\ \underline{U}_{S1}^A - \underline{U}_{S1}^E \\ \underline{U}_{L2}^A - \underline{U}_{L2}^E \\ \underline{U}_{S2}^A - \underline{U}_{S2}^E \\ \underline{U}_{L3}^A - \underline{U}_{L3}^E \\ \underline{U}_{S3}^A - \underline{U}_{S3}^E \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{L1} & \underline{Z}_{L1S1} & \underline{Z}_{L1L2} & \underline{Z}_{L1S2} & \underline{Z}_{L1L3} & \underline{Z}_{L1S3} \\ \underline{Z}_{S1L1} & \underline{Z}_{S1} & \underline{Z}_{S1L2} & \underline{Z}_{S1S2} & \underline{Z}_{S1L3} & \underline{Z}_{S1S3} \\ \underline{Z}_{L2L1} & \underline{Z}_{L2S1} & \underline{Z}_{L2} & \underline{Z}_{L2S2} & \underline{Z}_{L2L3} & \underline{Z}_{L2S3} \\ \underline{Z}_{S2L1} & \underline{Z}_{S2S1} & \underline{Z}_{S2L2} & \underline{Z}_{S2} & \underline{Z}_{S2L3} & \underline{Z}_{S2S3} \\ \underline{Z}_{L3L1} & \underline{Z}_{L3S1} & \underline{Z}_{L3L2} & \underline{Z}_{L3S2} & \underline{Z}_{L3} & \underline{Z}_{L3S3} \\ \underline{Z}_{S3L1} & \underline{Z}_{S3S1} & \underline{Z}_{S3L2} & \underline{Z}_{S3S2} & \underline{Z}_{S3L3} & \underline{Z}_{S3} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{S1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{S2} \\ \underline{I}_{L3} \\ \underline{I}_{S3} \end{pmatrix}$$

Partitionierte Impedanzmatrix – Längsspannungsabfälle

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1}^A - \underline{U}_{L1}^E \\ \underline{U}_{L2}^A - \underline{U}_{L2}^E \\ \underline{U}_{L3}^A - \underline{U}_{L3}^E \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \underline{U}_{S1}^A - \underline{U}_{S1}^E \\ \underline{U}_{S2}^A - \underline{U}_{S2}^E \\ \underline{U}_{S3}^A - \underline{U}_{S3}^E \end{bmatrix} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_{L1} & \underline{Z}_{L1L2} & \underline{Z}_{L1L3} \\ \underline{Z}_{L2L1} & \underline{Z}_{L2} & \underline{Z}_{L2L3} \\ \underline{Z}_{L3L1} & \underline{Z}_{L3L2} & \underline{Z}_{L3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \underline{Z}_{L1S1} & \underline{Z}_{L1S2} & \underline{Z}_{L1S3} \\ \underline{Z}_{L2S1} & \underline{Z}_{L2S2} & \underline{Z}_{L2S3} \\ \underline{Z}_{L3S1} & \underline{Z}_{L3S2} & \underline{Z}_{L3S3} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \underline{Z}_{S1L1} & \underline{Z}_{S1L2} & \underline{Z}_{S1L3} \\ \underline{Z}_{S2L1} & \underline{Z}_{S2L2} & \underline{Z}_{S2L3} \\ \underline{Z}_{S3L1} & \underline{Z}_{S3L2} & \underline{Z}_{S3L3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \underline{Z}_{S1} & \underline{Z}_{S1S2} & \underline{Z}_{S1S3} \\ \underline{Z}_{S2S1} & \underline{Z}_{S2} & \underline{Z}_{S2S3} \\ \underline{Z}_{S3S1} & \underline{Z}_{S3S2} & \underline{Z}_{S3} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \\ \underline{I}_{S1} \\ \underline{I}_{S2} \\ \underline{I}_{S3} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \underline{\Delta U}_L \\ \underline{\Delta U}_S \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{LL} & \underline{Z}_{LS} \\ \underline{Z}_{SL} & \underline{Z}_{SS} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_L \\ \underline{I}_S \end{pmatrix}$$

Lösung des Gleichungssystems durch Modifikation der Leitungsparameter

$$\begin{pmatrix} \Delta \underline{U}_L \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [\underline{Z}_{LL}] & [\underline{Z}_{LS}] \\ [\underline{Z}_{SL}] & [\underline{Z}_{SS}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_L \\ \underline{I}_S \end{pmatrix}$$

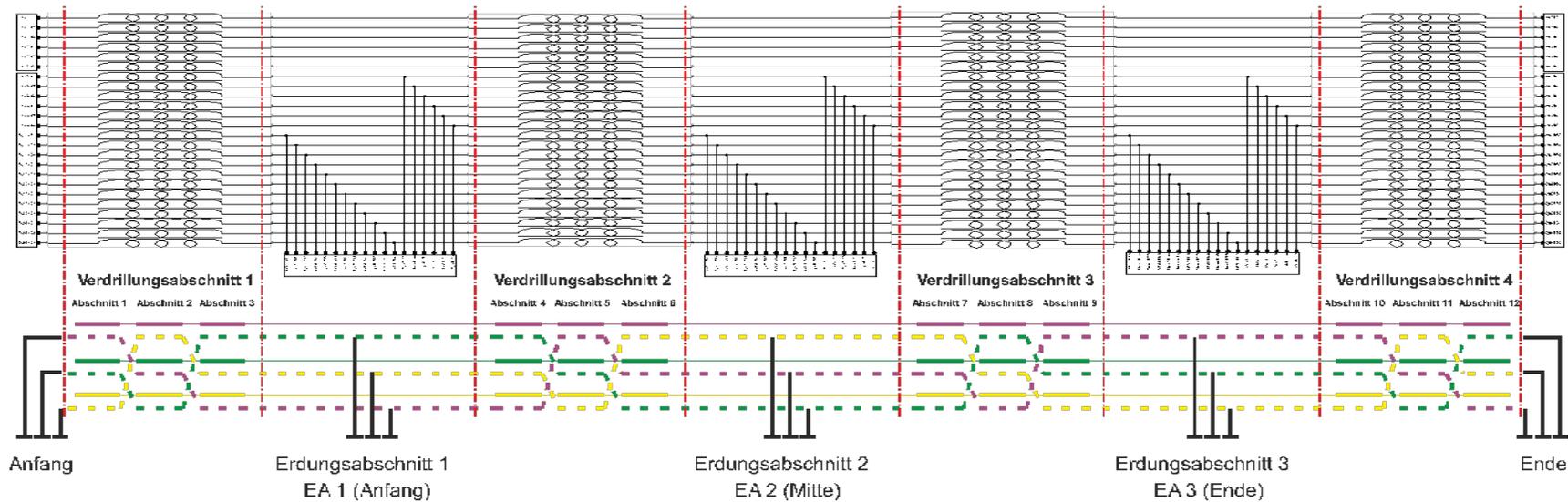
$$\underline{I}_S = -[\underline{Z}_{SS}]^{-1} [\underline{Z}_{SL}] \underline{I}_L$$

$$\Delta \underline{U}_L = [\underline{Z}_{LL}] \underline{I}_L - [\underline{Z}_{LS}] [\underline{Z}_{SS}]^{-1} [\underline{Z}_{SL}] \underline{I}_L$$

$$\Delta \underline{U}_L = \left([\underline{Z}_{LL}] - [\underline{Z}_{LS}] [\underline{Z}_{SS}]^{-1} [\underline{Z}_{SL}] \right) \underline{I}_L$$

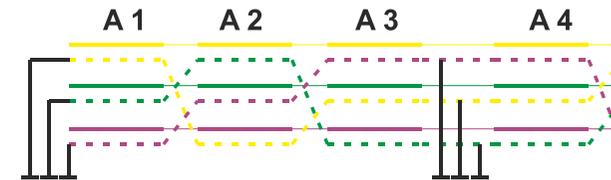
$$\Delta \underline{U}_L = [\underline{Z}]^* \underline{I}_L$$

Simulationsmodell



Crossbonding intakt und fehlerbehaftet

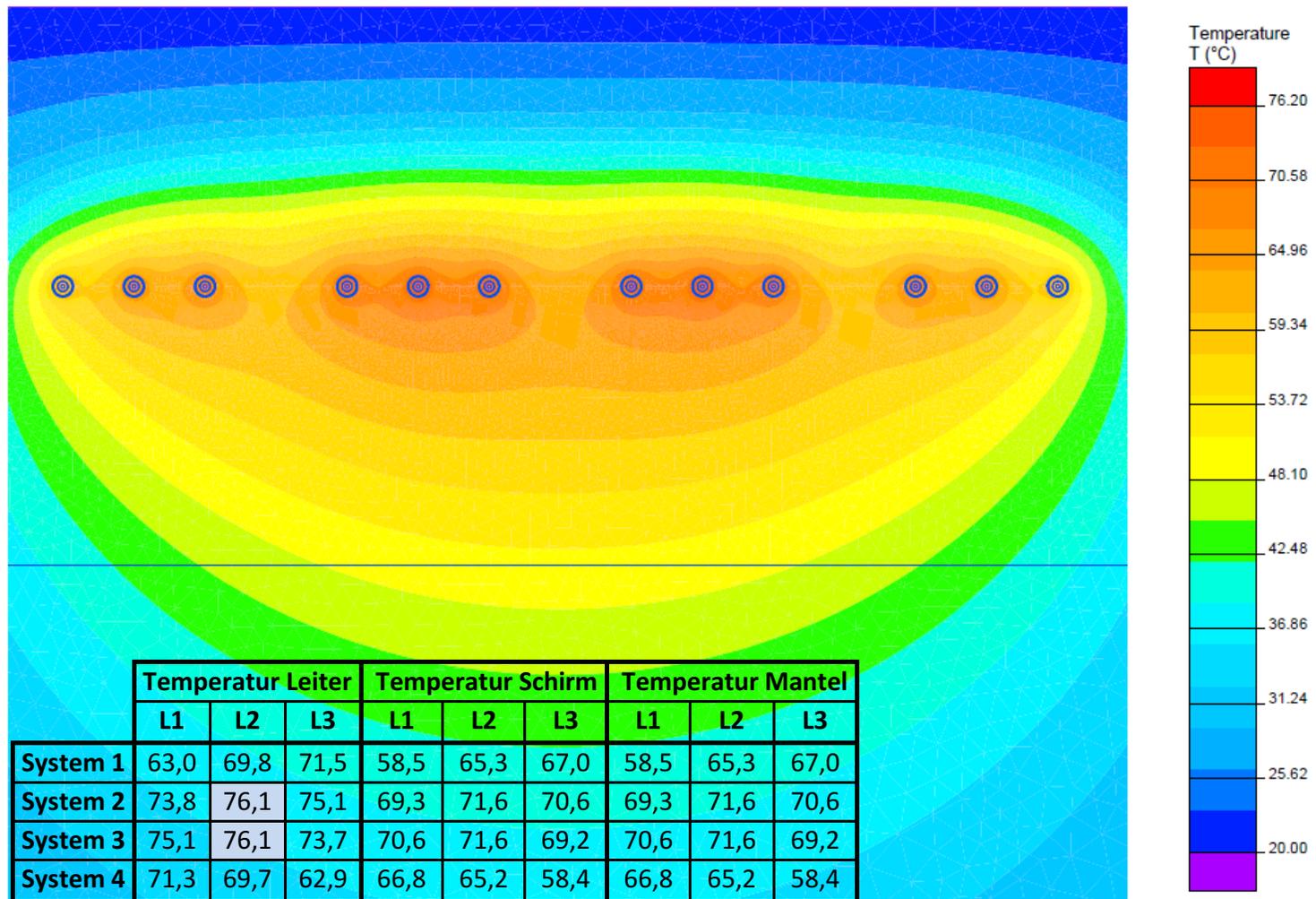
induzierte Ströme



		Simulation 1			Simulation 2			Simulation 3			Simulation 4		
Crossbonding-Fehler		Nein			Zwischen A1 und A2 im System 1 Kabelschirm 1			Zwischen A1 und A2 im System 2 Kabelschirm 3			Zwischen A1 und A2 im System 3 Kabelschirm 1		
Abschnitt			A1	A2		A1	A2		A1	A2		A1	A2
		Leiter	Schirm		Leiter	Schirm		Leiter	Schirm		Leiter	Schirm	
		A	A		A	A		A	A		A	A	
System 1	L1	1035	91	91	1035	309	62	1035	86	86	1035	86	86
	L2	1035	93	93	1035	92	92	1035	90	90	1035	92	92
	L3	1035	94	94	1035	89	89	1035	98	98	1035	90	90
System 2	L1	1035	7	7	1035	11	11	1035	11	11	1035	5	5
	L2	1035	10	10	1035	3	3	1035	13	13	1035	8	8
	L3	1035	7	7	1035	6	6	1035	206	73	1035	16	16
System 3	L1	1035	12	12	1035	10	10	1035	13	13	1035	212	70
	L2	1035	11	11	1035	12	12	1035	9	9	1035	6	6
	L3	1035	9	9	1035	14	14	1035	8	8	1035	13	13
System 4	L1	1035	91	91	1035	93	93	1035	88	88	1035	93	93
	L2	1035	91	90	1035	92	92	1035	89	89	1035	92	92
	L3	1035	90	90	1035	93	93	1035	91	91	1035	93	93

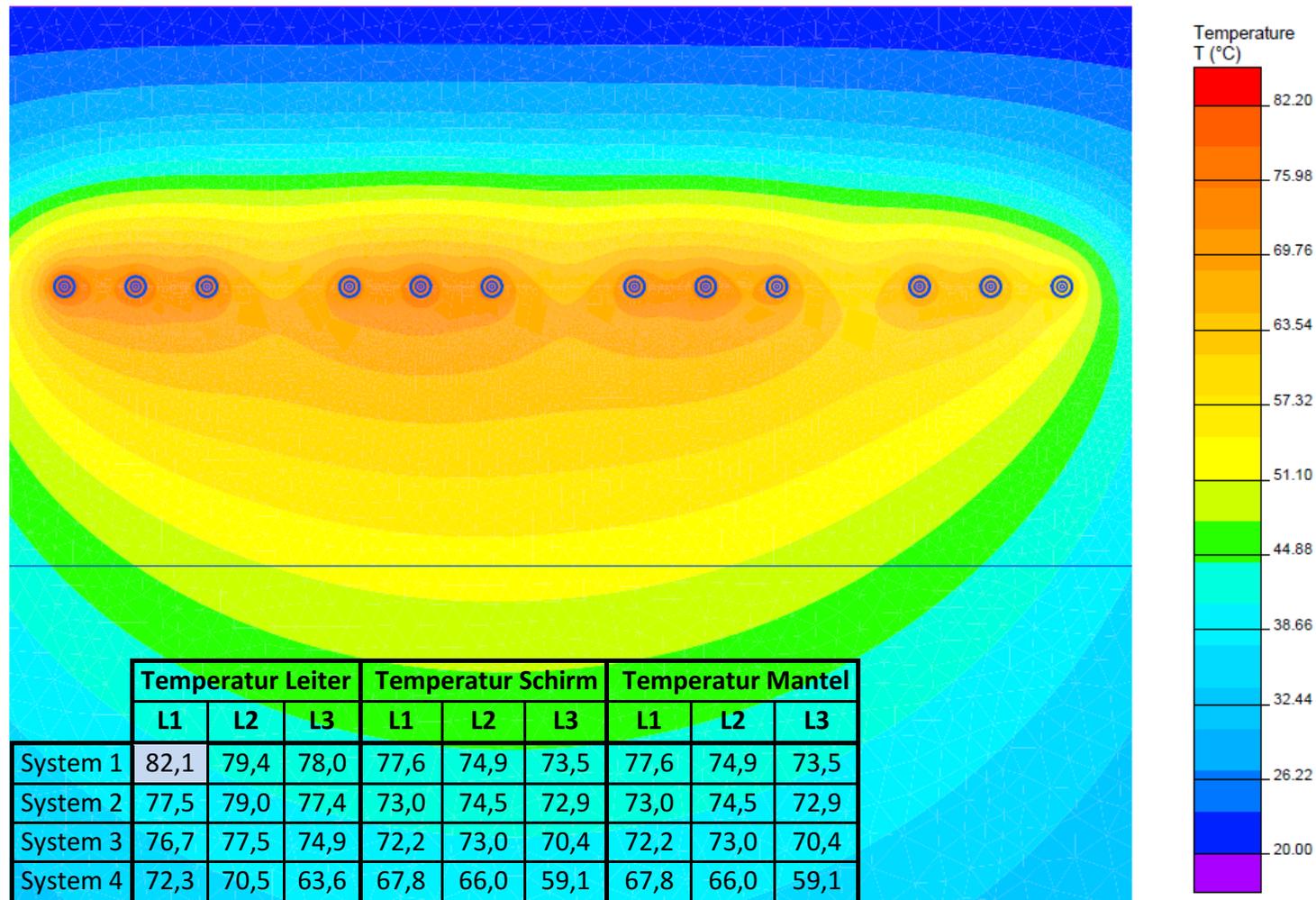
Crossbonding intakt

Stationäre thermische Betrachtungen - Simulation 1



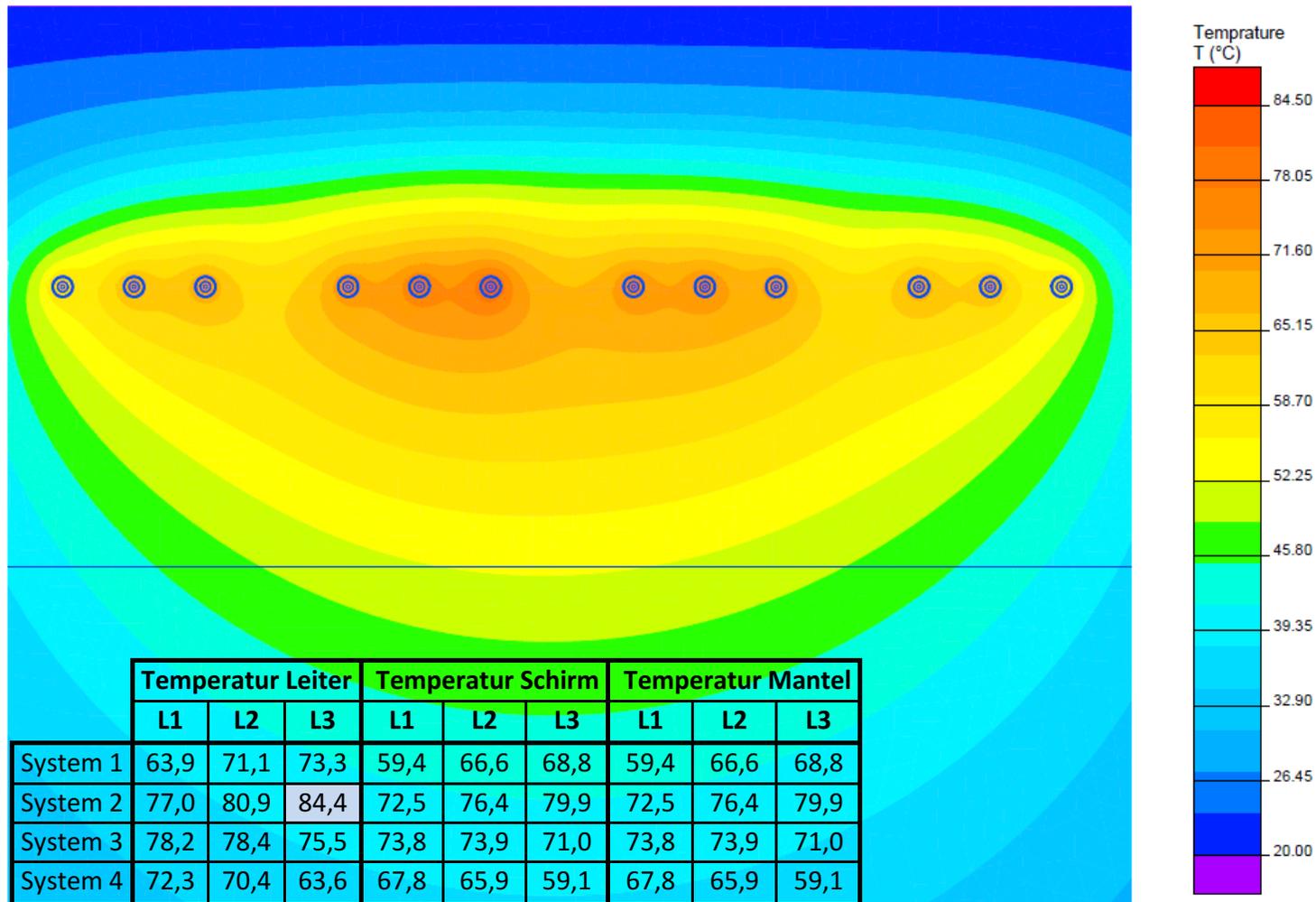
Crossbonding Fehler im Sys. 1 – KS 1

Stationäre thermische Betrachtungen - Simulation 2



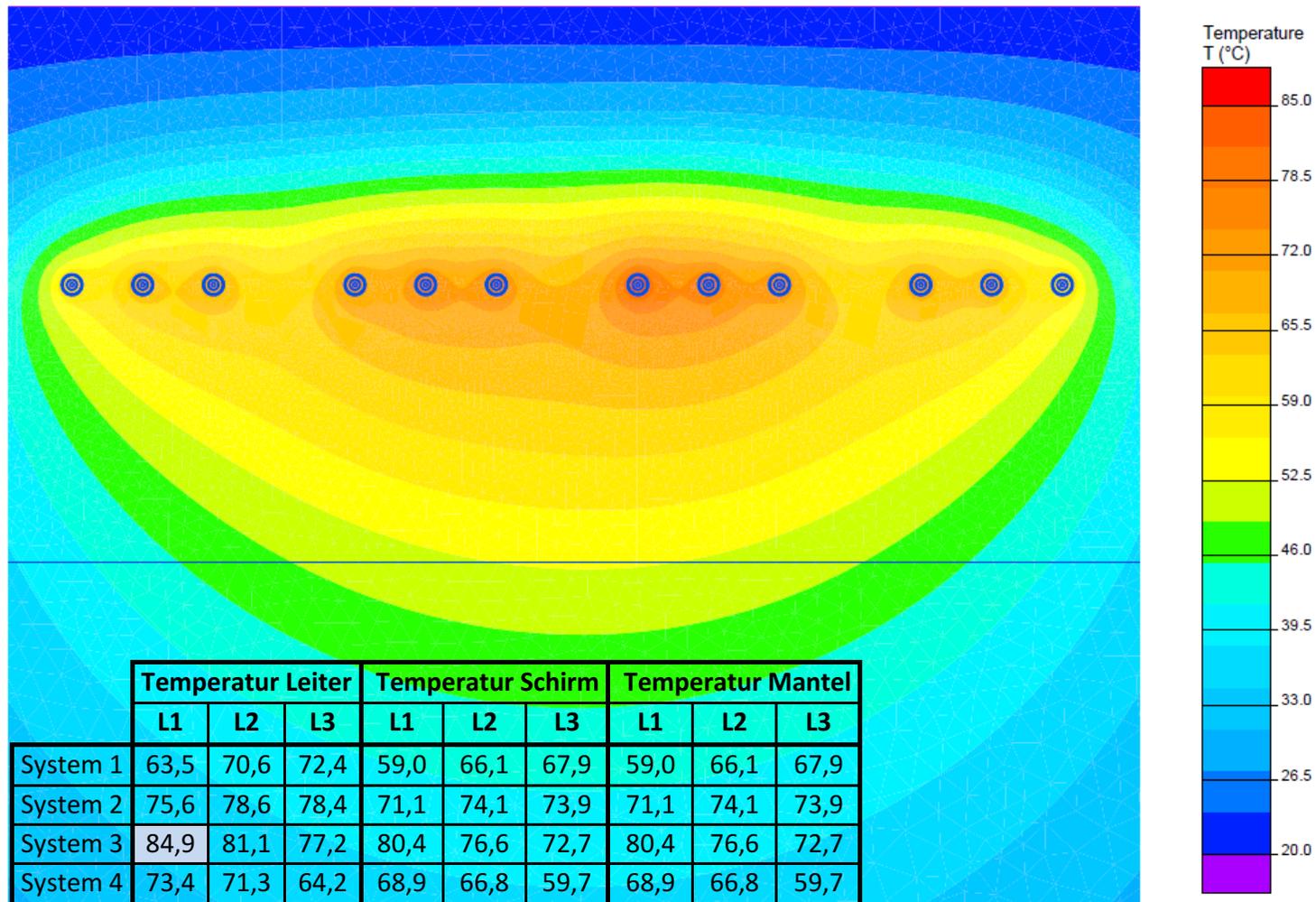
Crossbonding Fehler im Sys. 2 – KS 3

Stationäre thermische Betrachtungen - Simulation 3



Crossbonding Fehler im Sys. 3 – KS 1

Stationäre thermische Betrachtungen - Simulation 4



Crossbonding Fehler

Ströme - Variantenrechnungen

CB intakt	Doppelkabelsystem 1		Doppelkabelsystem 2	
	System 1	System 2	System 3	System 4
Normalbetrieb - CB intakt	1035 A	1035 A	1035 A	1035 A
Fehler A - CB intakt	1725 A	1725 A	1725 A	1725 A
Fehler B - CB intakt	1725 A	1725 A	0A	0A

CB fehlerhaft	Doppelkabelsystem 1		Doppelkabelsystem 2	
	System 1	System 2	System 3	System 4
Normalbetrieb - CB fehlerhaft	1035 A	1035 A	1035 A	1035 A
Fehler A - CB fehlerhaft	1725 A	1725 A	1725 A	1725 A
Fehler B - CB fehlerhaft	1725 A	1725 A	0A	0A

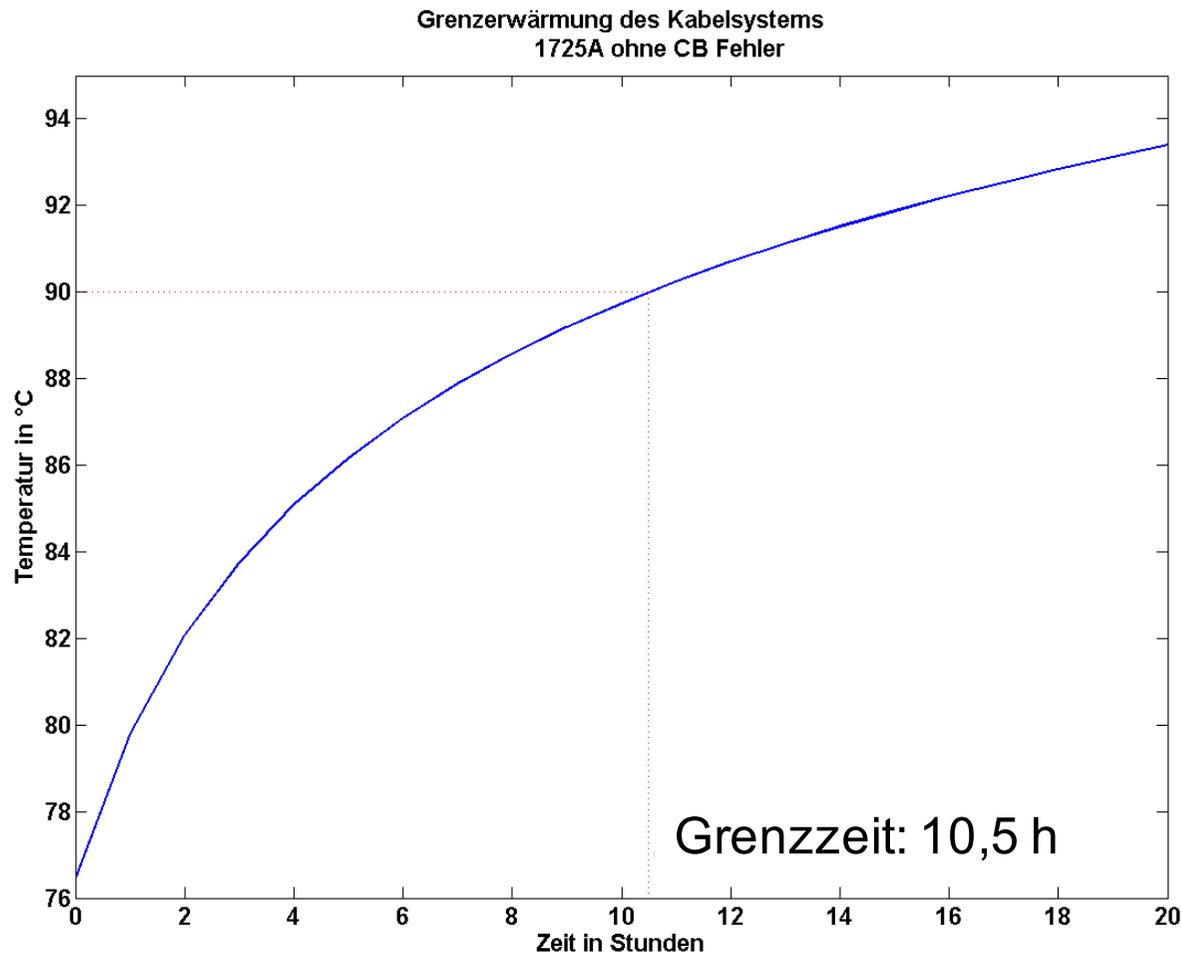
Crossbonding Fehler - Ströme

Variantenrechnungen

Simulation		Sim 1		Sim 2		Sim 3		Sim 4	
Crossbonding-Fehler		Nein		Zwischen A1 und A2 im System 2 Kabelschirm 3		Nein		Zwischen A1 und A2 im System 2 Kabelschirm 1	
		Leiter	Schirm	Leiter	Schirm	Leiter	Schirm	Leiter	Schirm
		A	A	A	A	A	A	A	A
System 1	L1	1725	151	1725	149	1725	150	1725	144
	L2	1725	151	1725	152	1725	150	1725	145
	L3	1725	151	1725	157	1725	150	1725	147
System 2	L1	1725	14	1725	16	1725	90	1725	281
	L2	1725	14	1725	20	1725	90	1725	100
	L3	1725	14	1725	338	1725	90	1725	90
System 3	L1	1725	18	1725	20	167	43	167	48
	L2	1725	18	1725	14	52	43	52	45
	L3	1725	18	1725	12	34	43	34	45
System 4	L1	1725	150	1725	145	10	4	10	6
	L2	1725	150	1725	148	6	4	6	6
	L3	1725	150	1725	150	7	4	8	8

Crossbonding intakt

Transiente thermische Betrachtungen - Simulation 1



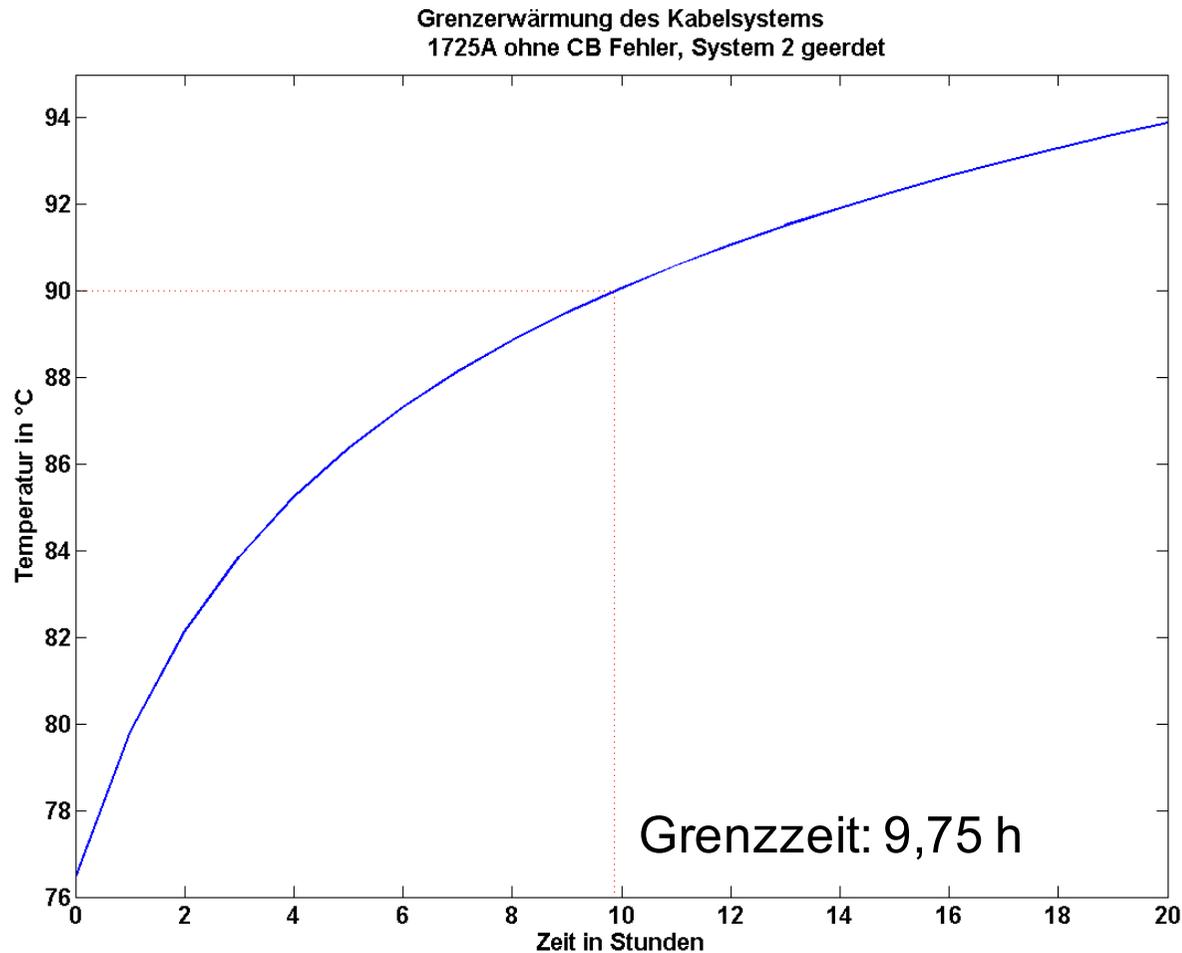
Crossbonding Fehler im Sys. 2 – KS 3

Transiente thermische Betrachtungen - Simulation 2



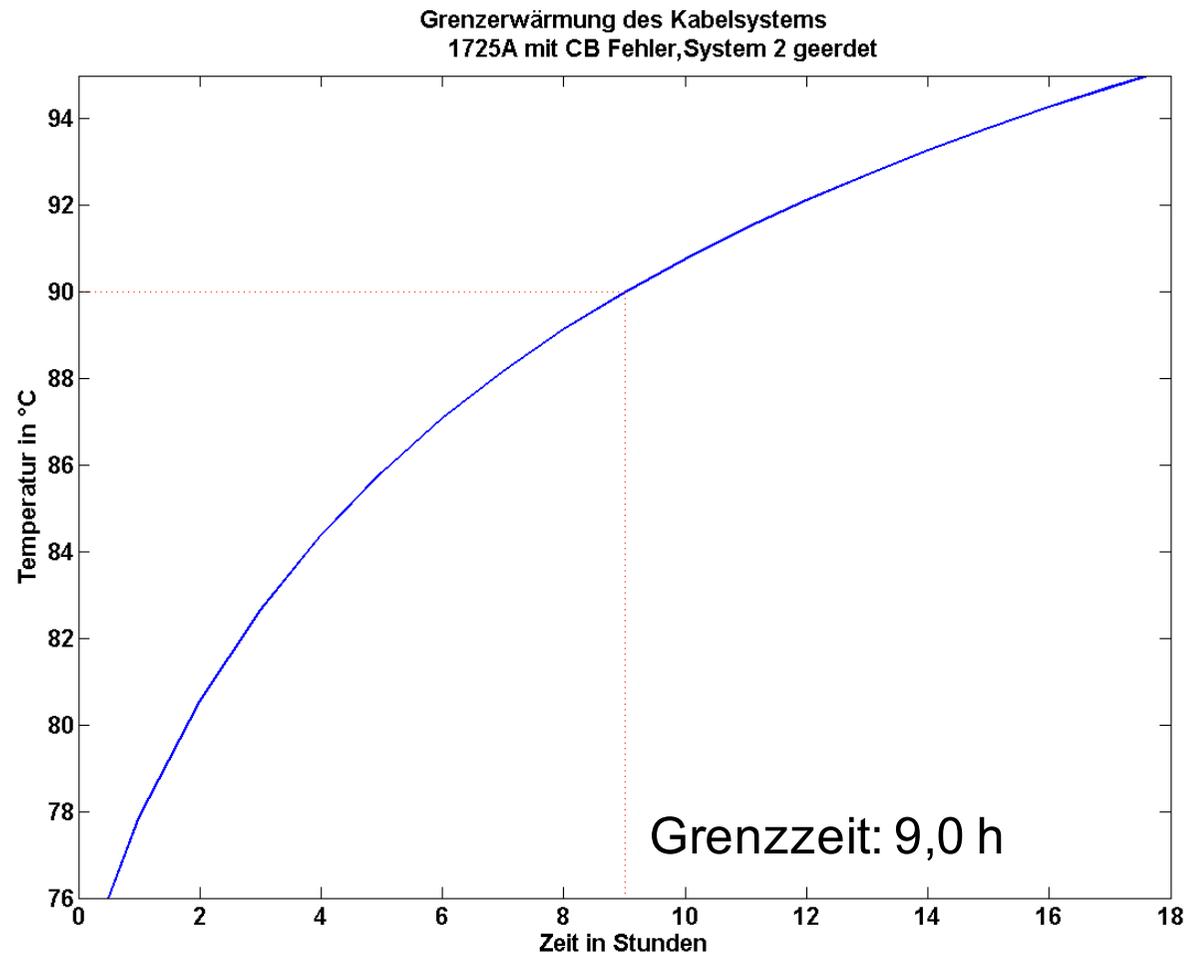
Crossbonding intakt

Transiente thermische Betrachtungen - Simulation 3



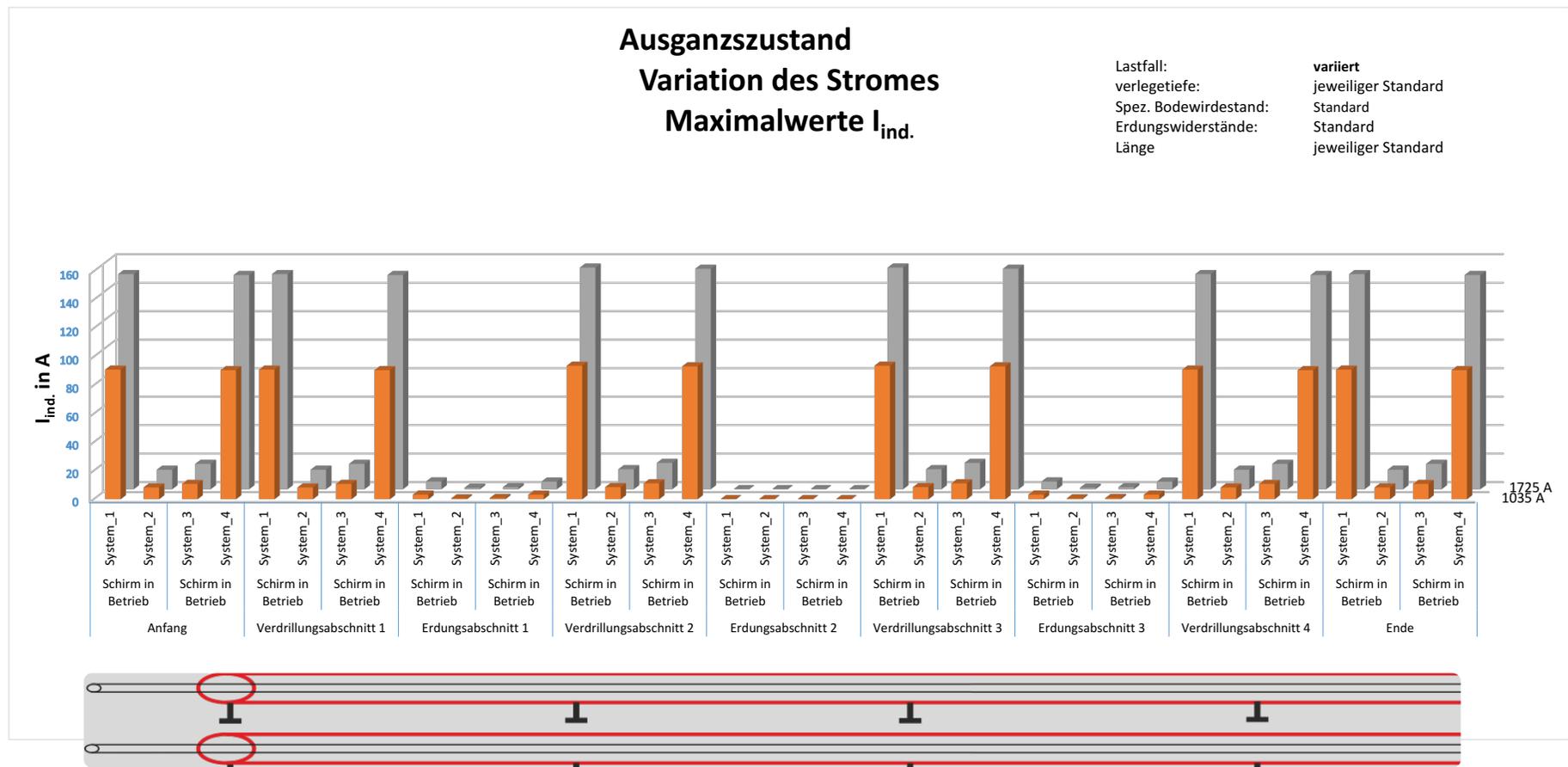
Crossbonding Fehler im Sys. 2 – KS 1

Transiente thermische Betrachtungen - Simulation 4

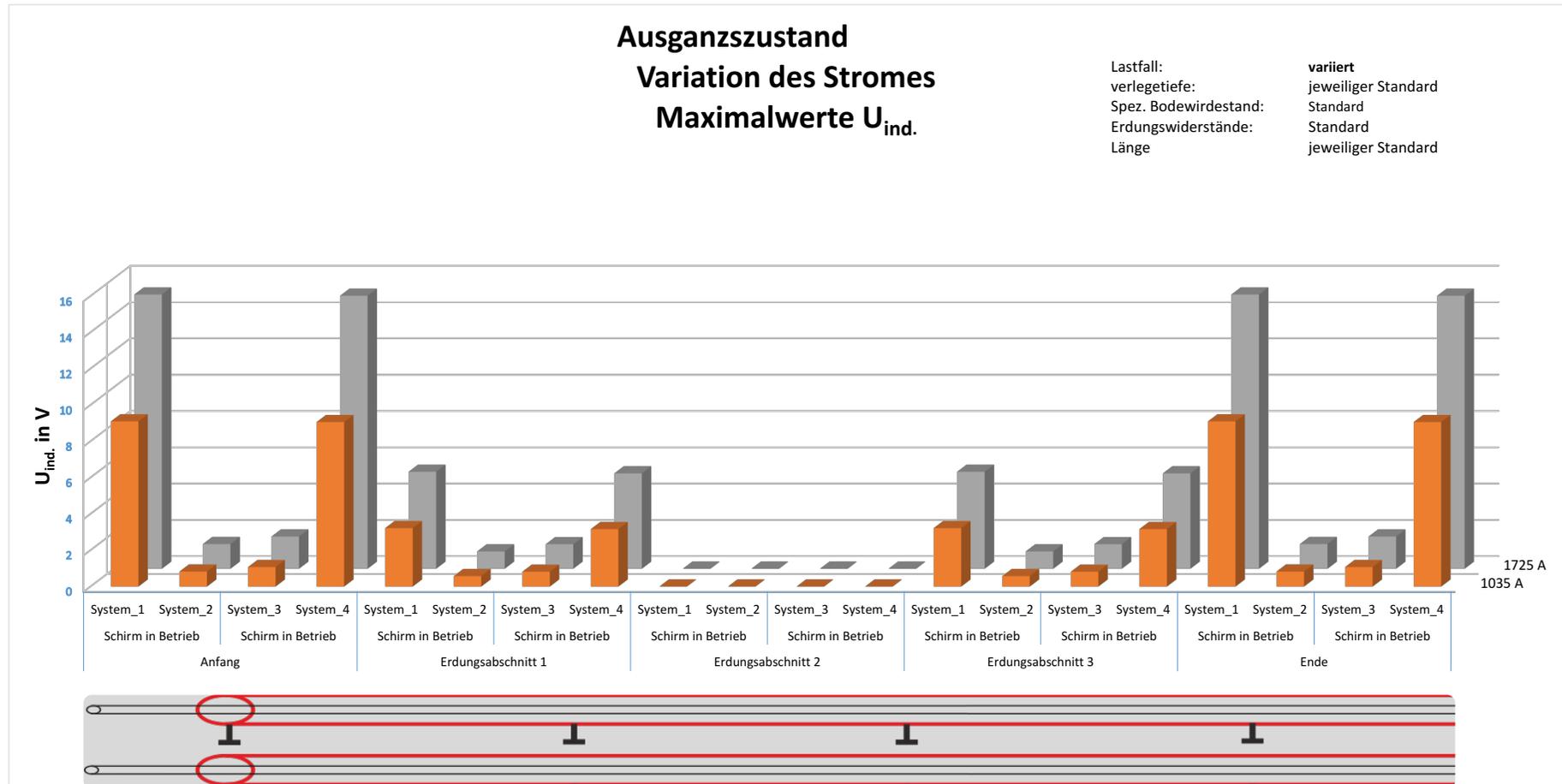


Ausgangszustand - I_{ind}

Variation von I

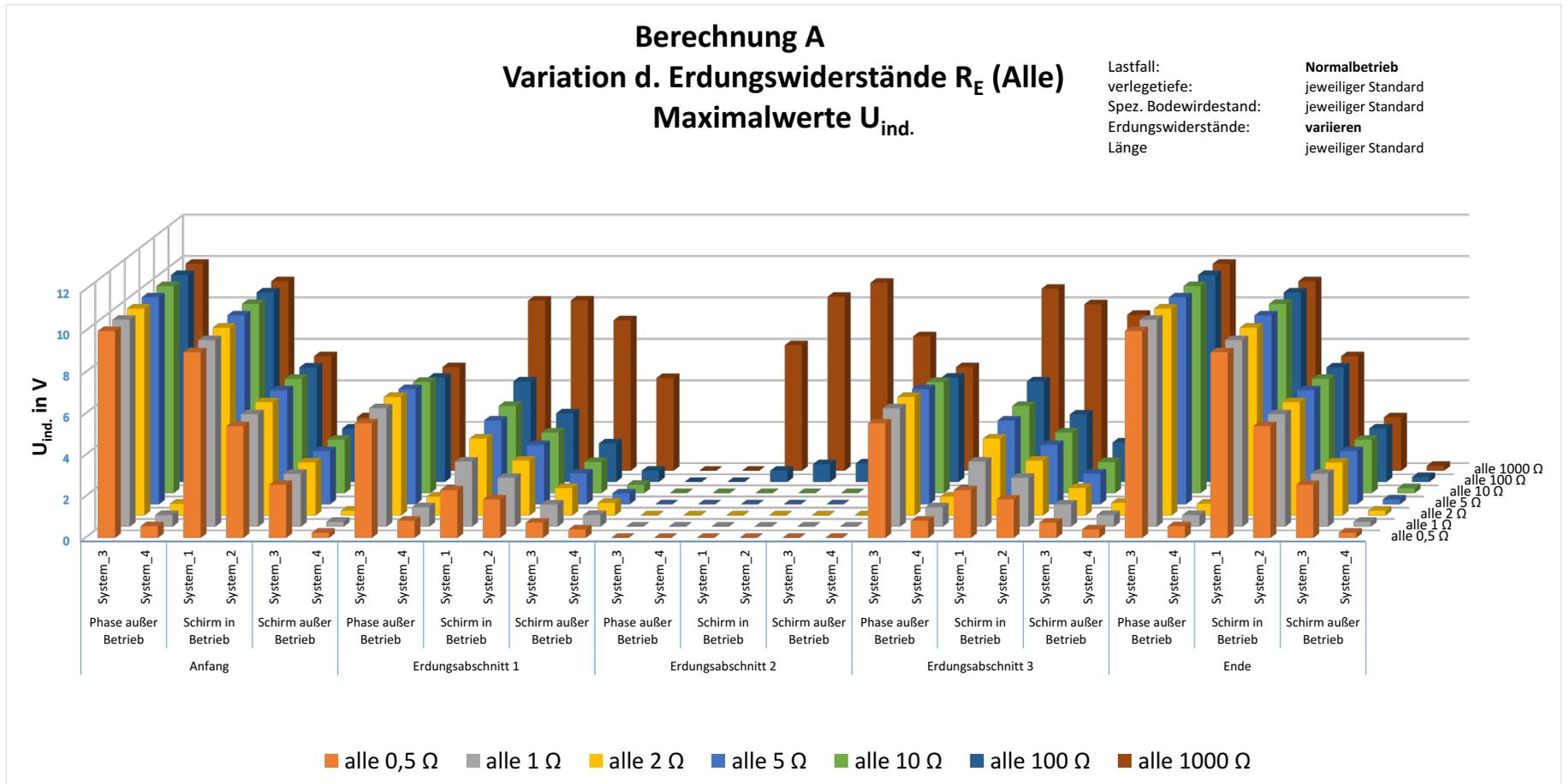
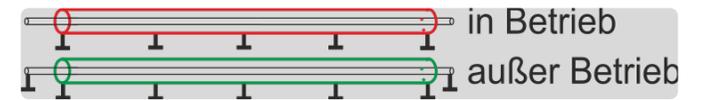


Ausgangszustand – U_{ind} Variation von I



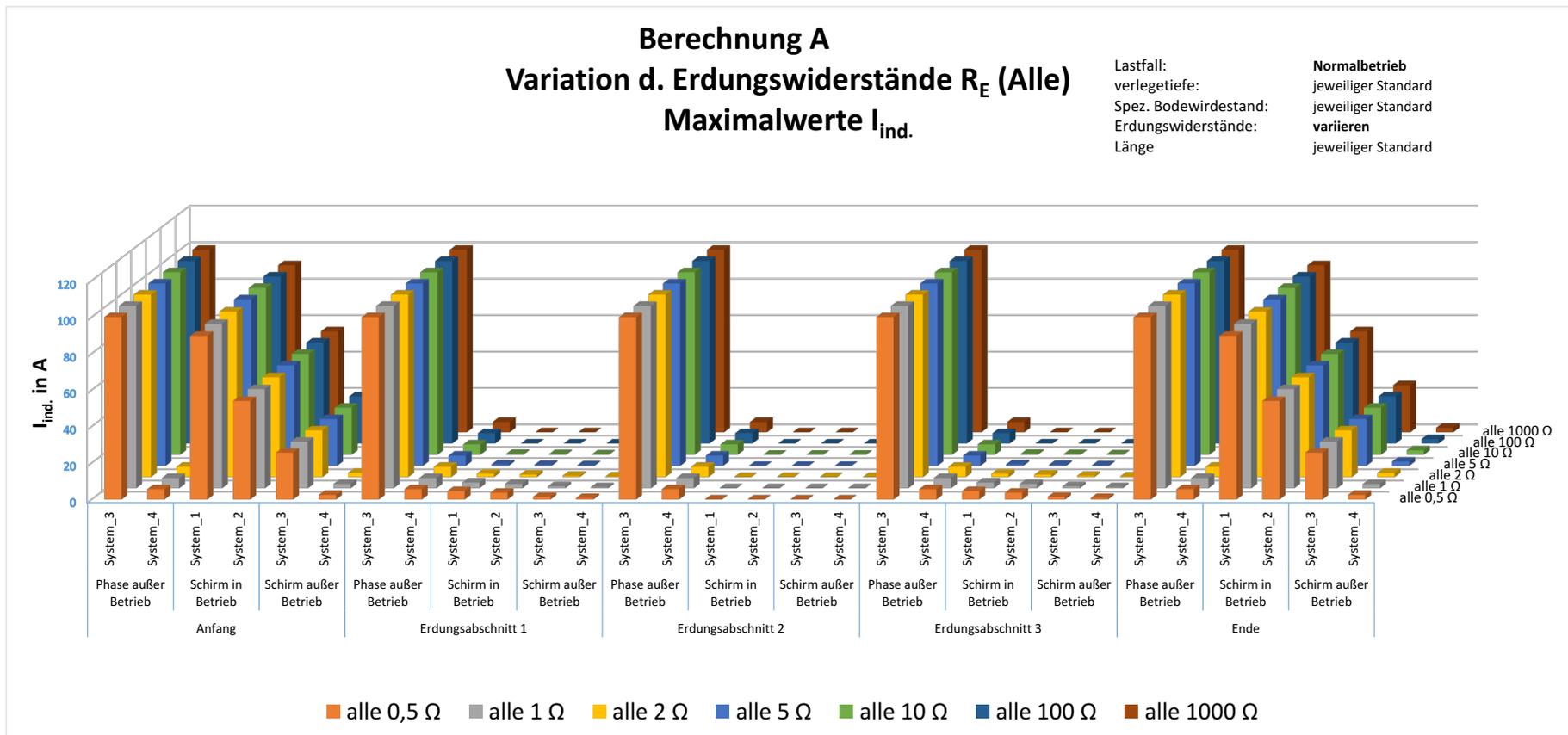
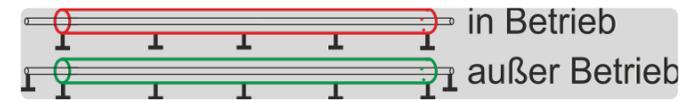
Berechnung A - U_{ind}

Variation v. R_E (Alle Erdungsabschn.)



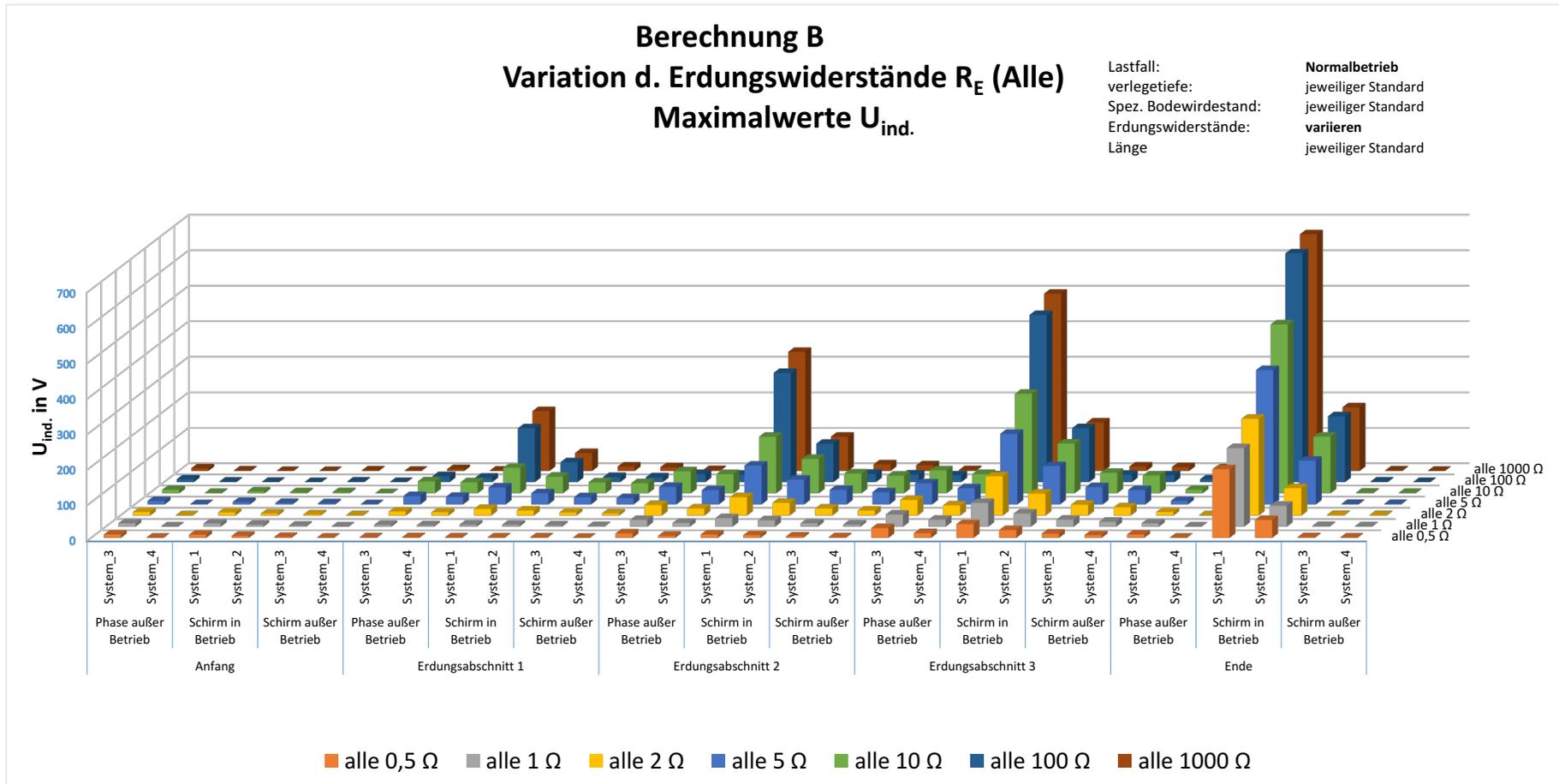
Berechnung A - I_{ind}

Variation v. R_E (Alle Erdungsabschn.)



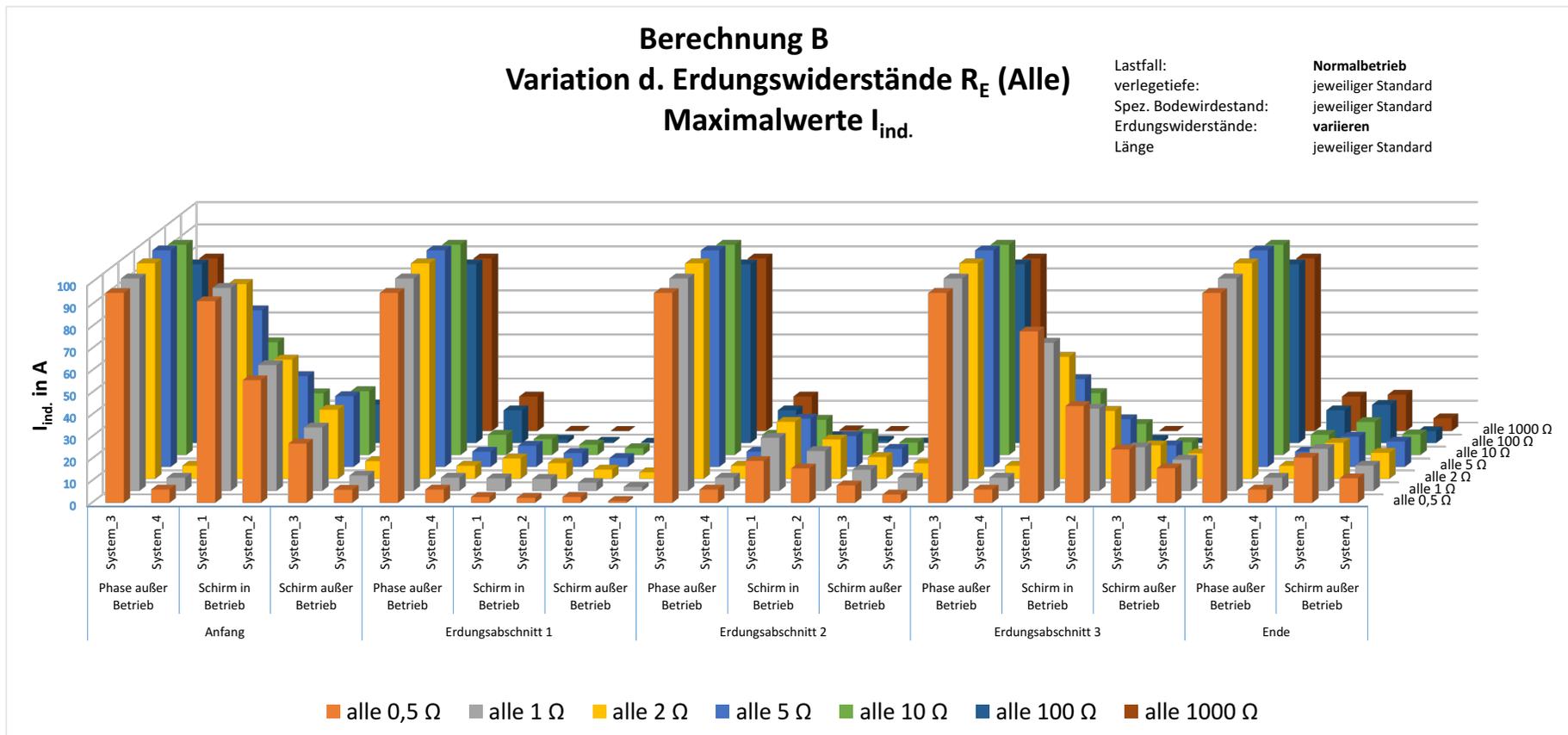
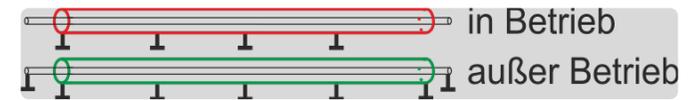
Berechnung B - U_{ind}

Variation v. R_E (Alle Erdungsabschn.)



Berechnung B - I_{ind}

Variation v. R_E (Alle Erdungsabschn.)



Beeinflussende Faktoren der induzierten Spannungen und Ströme

- Beeinflussende Ströme
- Schaltzustand
- Symmetrie
- Verlegeart (Dreieck, flach [horizontal, vertikal])
- Erdungswiderstände
- Verdrillungsart
- Abstände
- Anzahl der Abschnitte
- System- und Abschnittslänge
- Begleiterder
- Kabelschirm-Querschnittsfläche
- Spezifischer Bodenwiderstand
- Verlegetiefe

Auswirkungen von Crossbonding Fehlern und Anstieg von R_E

- Stromanstieg im betroffenen Kabelschirm
- Erhöhte Zusatzverluste
- Anstieg der Leitertemperaturen im Normalbetrieb
- Anstieg der Leitertemperaturen bei Grenzlast über maximal zulässigen Wert
- Verkürzung der zulässigen Betriebsdauer
- Ohne Temperaturmonitoring Verkürzung der Lebensdauer
- Erhöhung der Erdungswiderstände R_E führt ab bestimmten Werten zu stark ansteigenden Spannungen (auch an kilometerweit entfernten Orten) → Erdungswiderstände im Muffen- bzw. Endverschlussbereich niederohmig halten
- Niederohmige Erdungsanlagen führen zu erhöhten Zusatzverlusten
- Offene Erdungsverbindungen: Überschreitung höchstzulässiger Spannungswerte

Technische Voraussetzungen für den Einsatz von Hochspannungskabeln in elektrischen Netzen

Dipl.-Ing. Redzo Muratovic

redzo.muratovic@tugraz.at

+43/316/873-7556

Technische Universität Graz
Institut für Elektrische Anlagen

12. Februar 2016