

Erwärmung erdverlegter Kabelanlagen unter Berücksichtigung von Geometrie- und Materialeigenschaften der Bettung

von

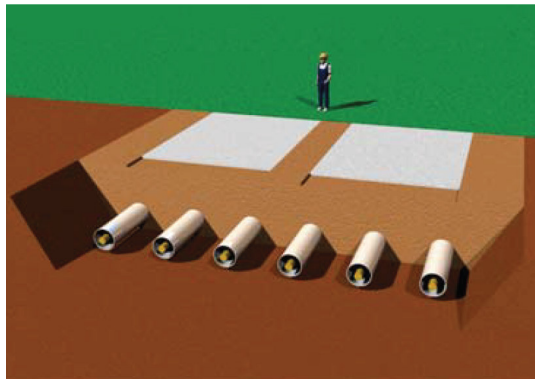
**Ralf-Dieter Rogler und Carsten Loth
HTW Dresden**

Inhalt

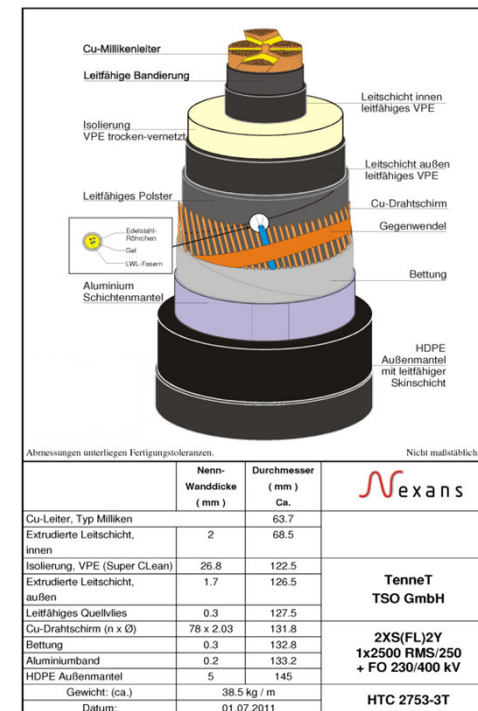
- 1 Problemdarstellung
- 2 Eigene Erbodenuntersuchungen
- 3 Thermisches Netzwerk Erdverlegter Kabel
- 4 Statistische Versuchsplanung (DoE)
- 5 Softwaretechnische Umsetzung
- 6 Variationsrechnungen
- 7 Zusammenfassung

1 Problemdarstellung

Erdverlegung von Energiekabeln

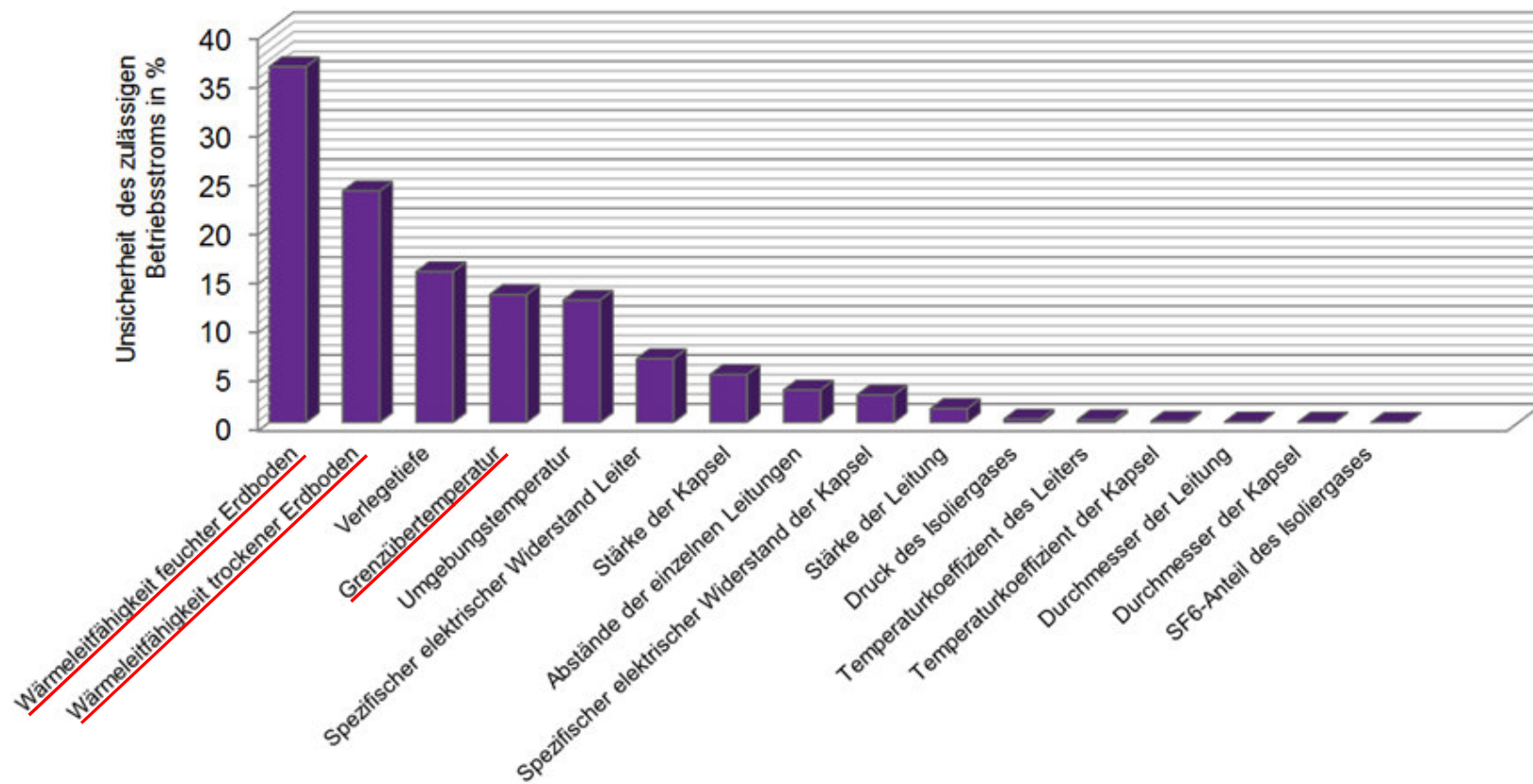


(Quelle: Siemens)

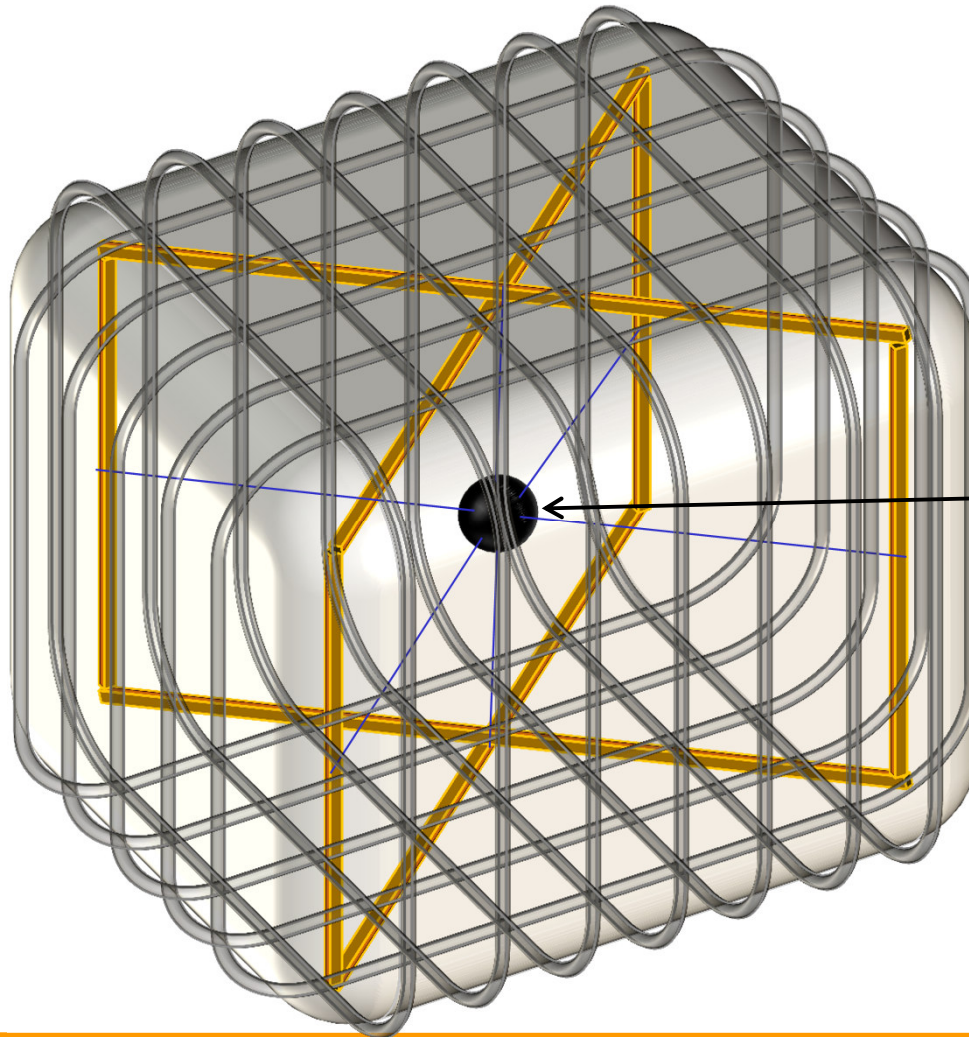


1 Problemdarstellung

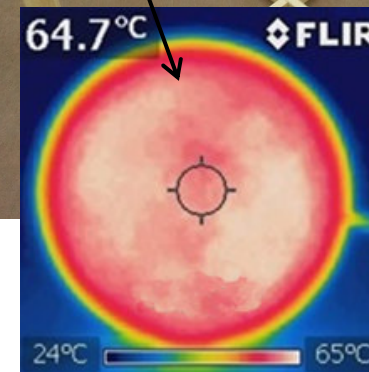
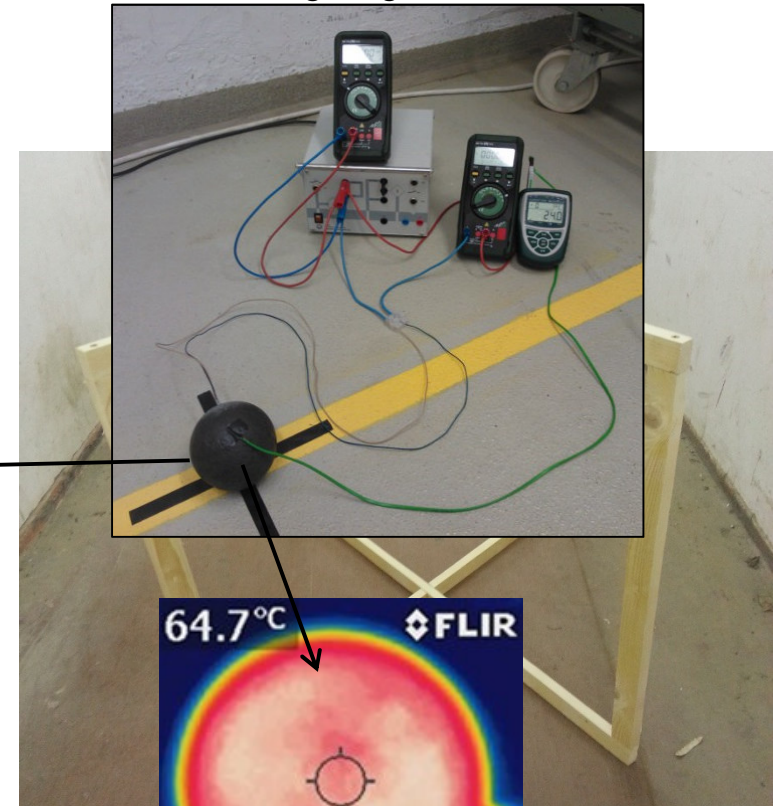
Unsicherheiten der Einflussfaktoren:



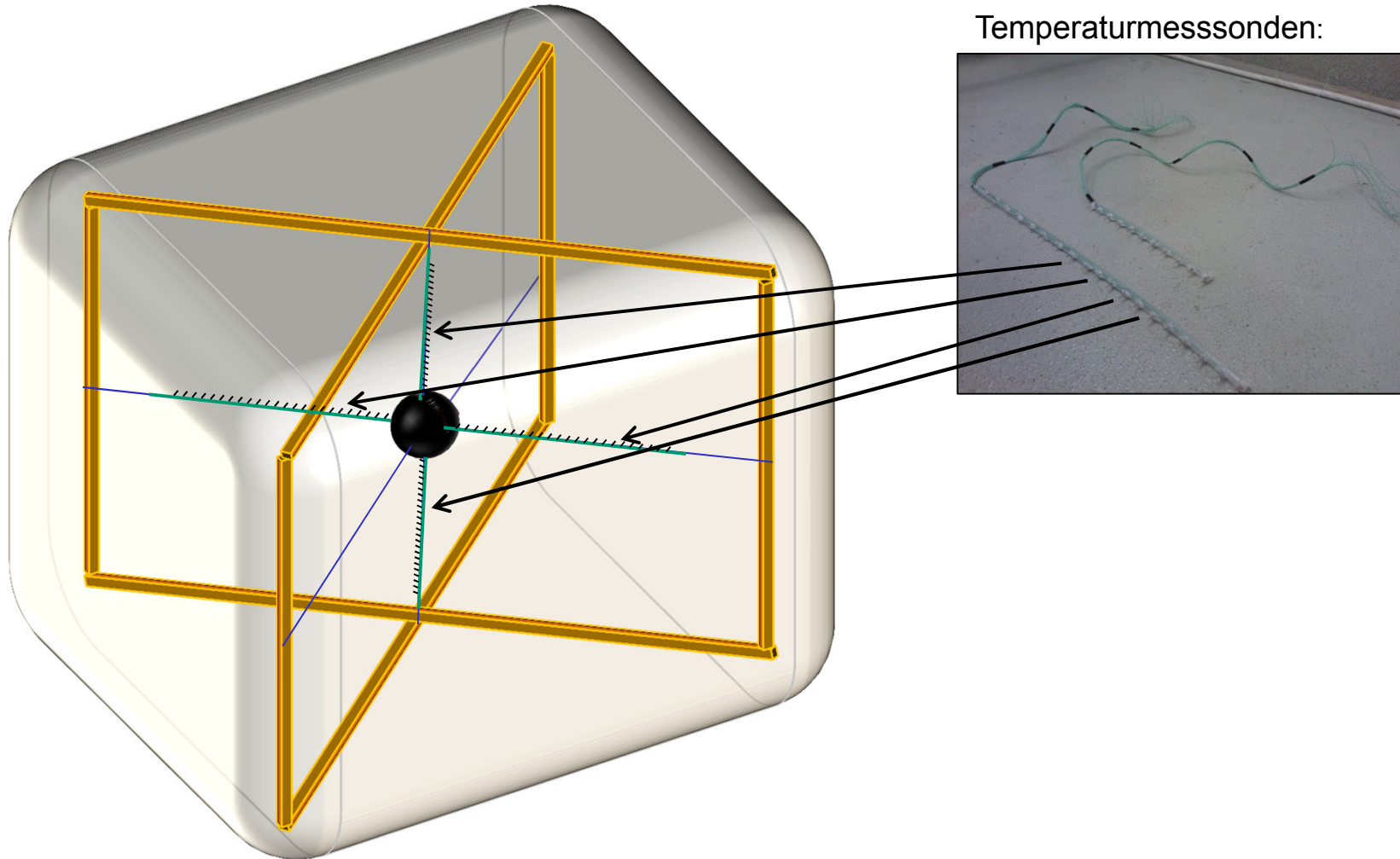
2 Eigene Erdbodenuntersuchungen



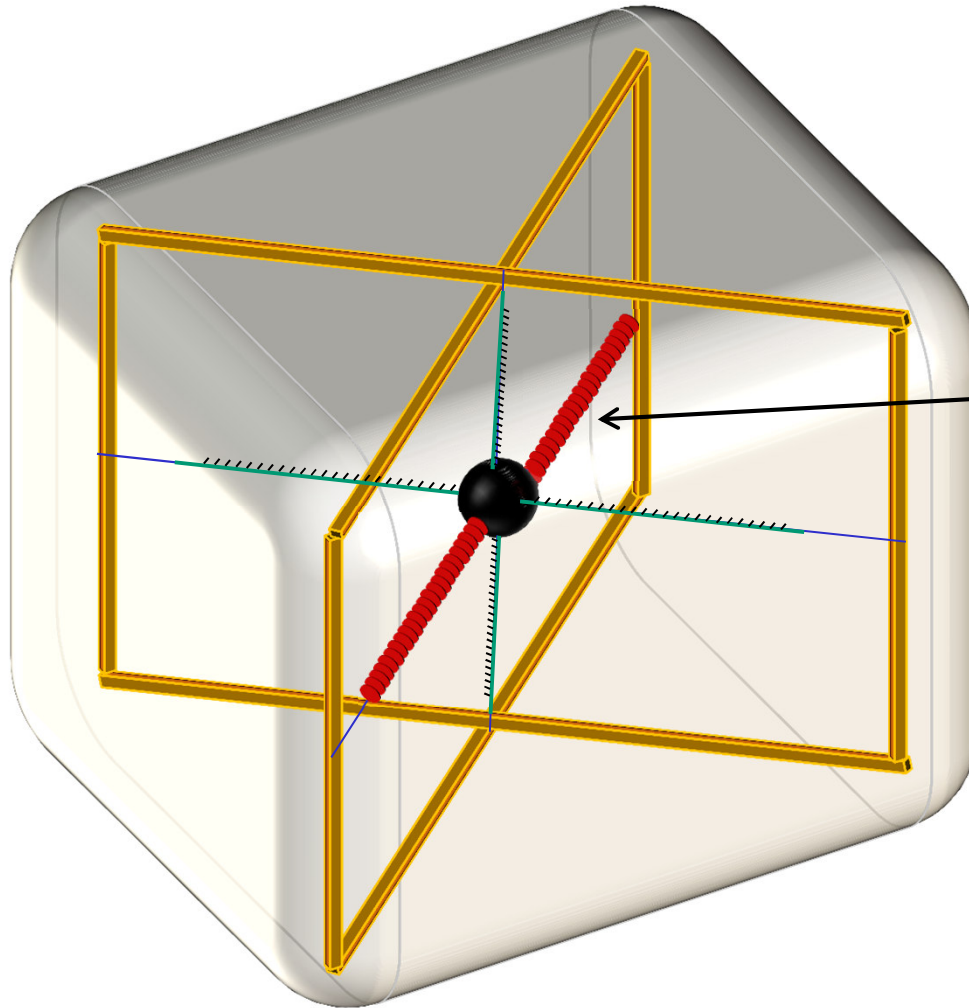
Erwärmung Kugel:



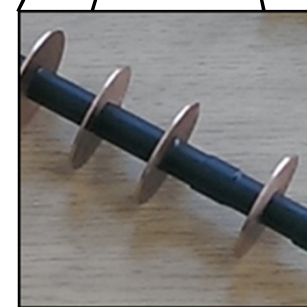
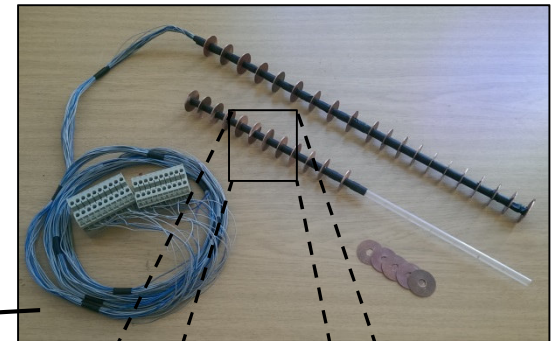
2 Eigene Erdbodenuntersuchungen



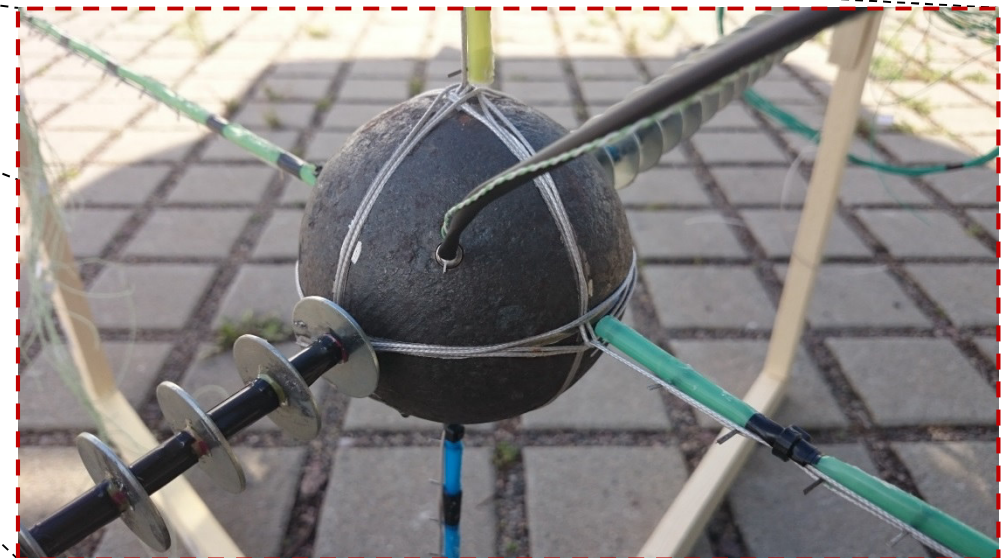
2 Eigene Erdbodenuntersuchungen



Widerstandsmesssonden:



2 Eigene Erdbodenuntersuchungen



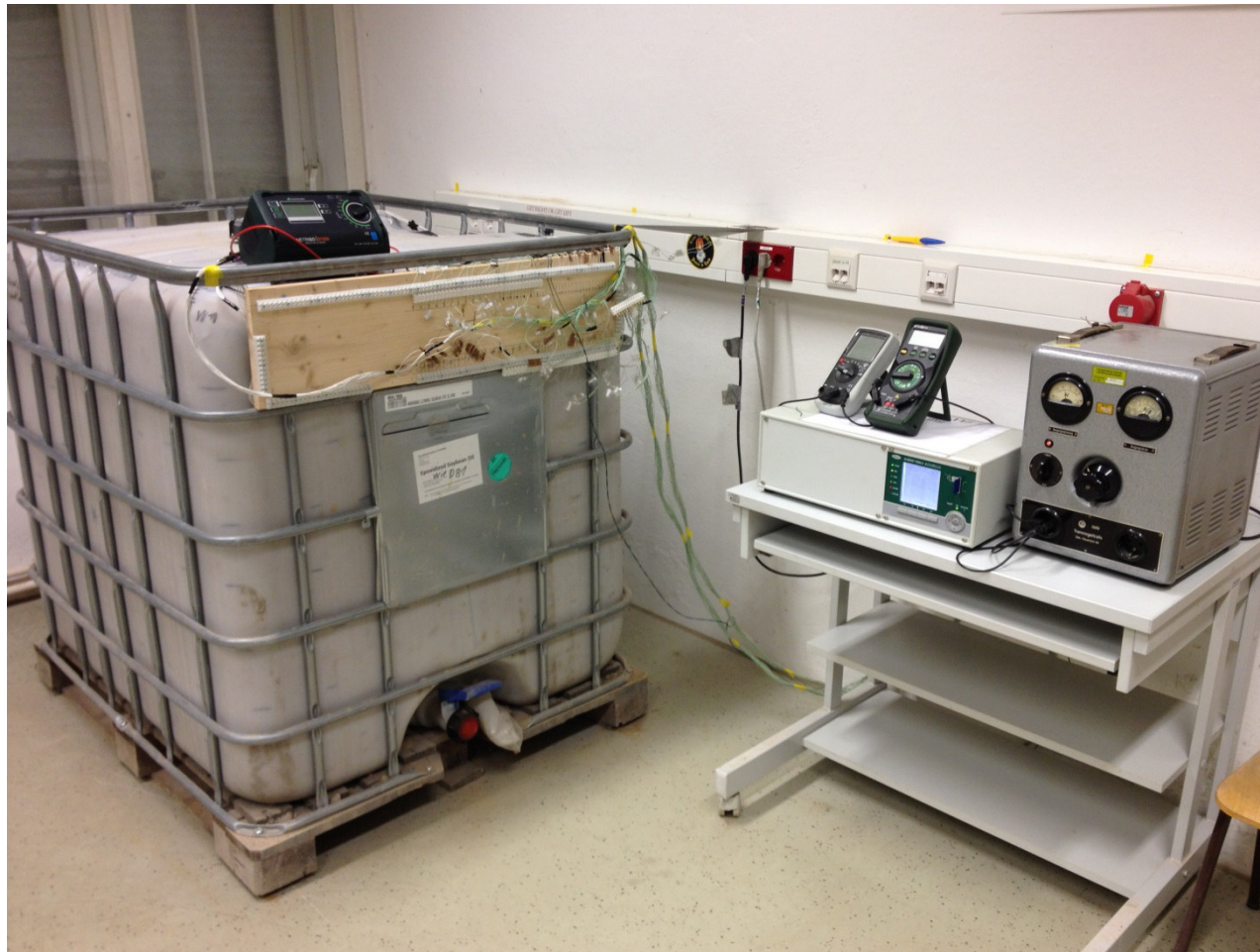
2 Eigene Erdbodenuntersuchungen



2 Eigene Erdbodenuntersuchungen



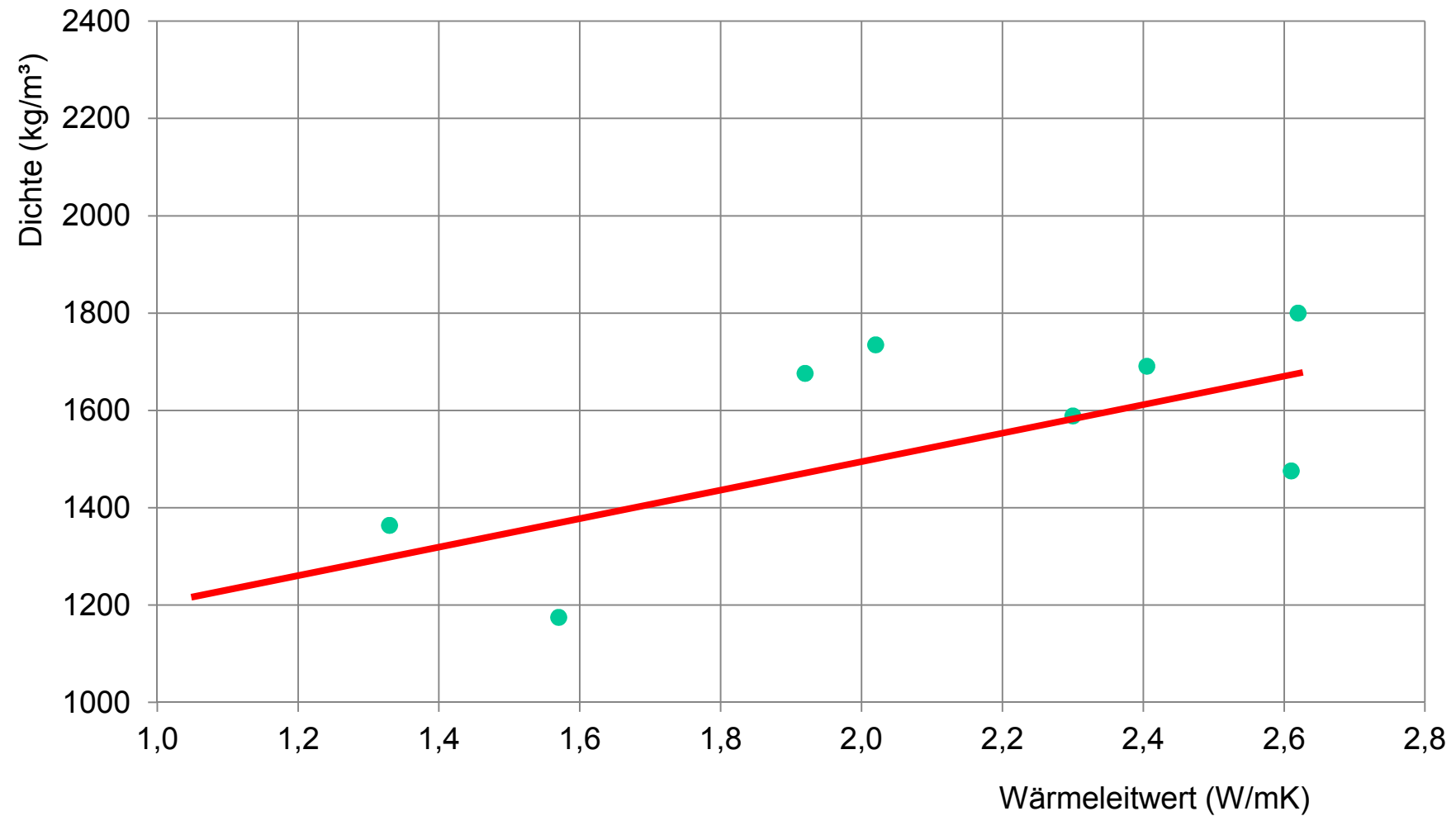
2 Eigene Erdbodenuntersuchungen



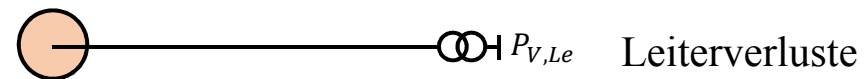
2 Eigene Erdbodenuntersuchungen

Boden	Wärmeleitfähigkeit feucht (W/mK)	Wärmeleitfähigkeit trocken (W/mK)	Grenzüber-temperatur (K)	Wärmeüber-gangskoeffi-zient (W/m ² K)
VDE-Sand	1,00	0,40	15,0	
Sandiger Boden	1,92	0,98	12,0	106
Flüssigboden (Lößlehm) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	1,33			318
Flüssigboden (Rotlagenkies) mit Bentonit	2,61			159
Flüssigboden (Rotlagenkies) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	2,30			318
Flüssigboden (Mergel) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	1,57			
Flüssigboden (Sand) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	2,02			318
DuoFill	2,62			80
Sandmischung (HeidelbergCement)	2,41	1,04	29,2	292
Mibau Granodiorit	1,53	0,70	35,4	168
Mibau Quarzdiorit	2,34			265
Köster-ThermBett	3,58			245

2 Eigene Erdbodenuntersuchungen



3 Thermisches Netzwerk Erdverlegter Kabel

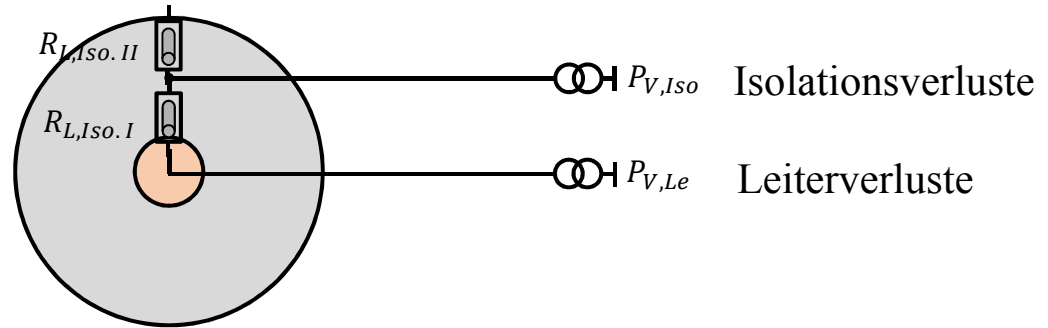


$$P_{V,Le} = I^2 \cdot R(\vartheta) \cdot k$$

3 Thermisches Netzwerk Erdverlegter Kabel

Isolationswiderstand (I)

Isolationswiderstand (II)



$$R_{L, Iso I} = \frac{\ln \frac{r_{m_+}}{r_{i_+}}}{\lambda_I \cdot 2\pi \cdot l}$$

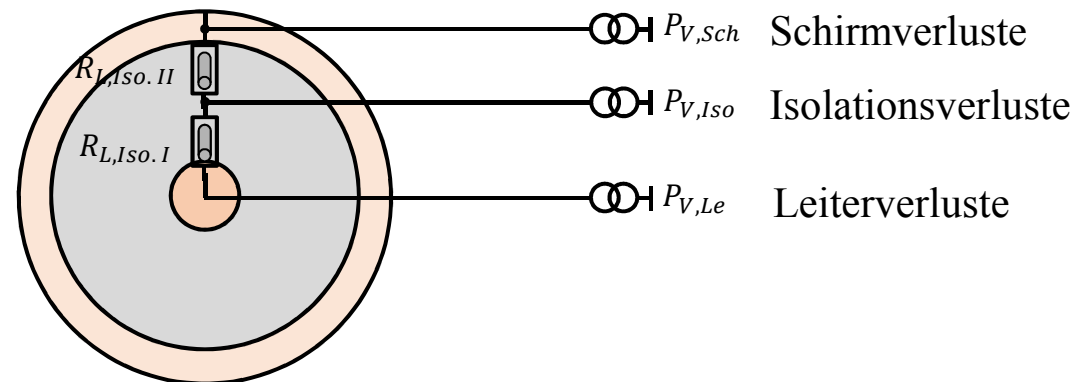
$$R_{L, Iso II} = \frac{\ln \frac{r_{a_+}}{r_{m_+}}}{\lambda_I \cdot 2\pi \cdot l}$$

$$P_{V, Iso} = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \delta$$

3 Thermisches Netzwerk Erdverlegter Kabel

Isolationswiderstand (I)

Isolationswiderstand (II)



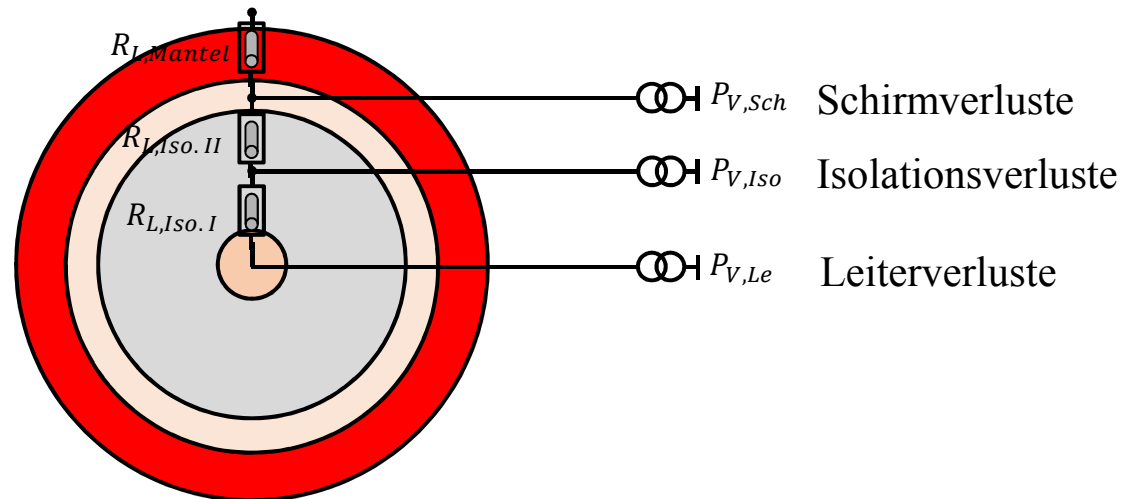
$$P_{V,Sch} = P_{V,Le} \cdot K$$

3 Thermisches Netzwerk Erdverlegter Kabel

Mantelwiderstand

Isolationswiderstand (I)

Isolationswiderstand (II)



$$R_{L,Mantel} = \frac{\ln \frac{r_{a_M}}{r_{i_M}}}{\lambda_M \cdot 2\pi \cdot l}$$

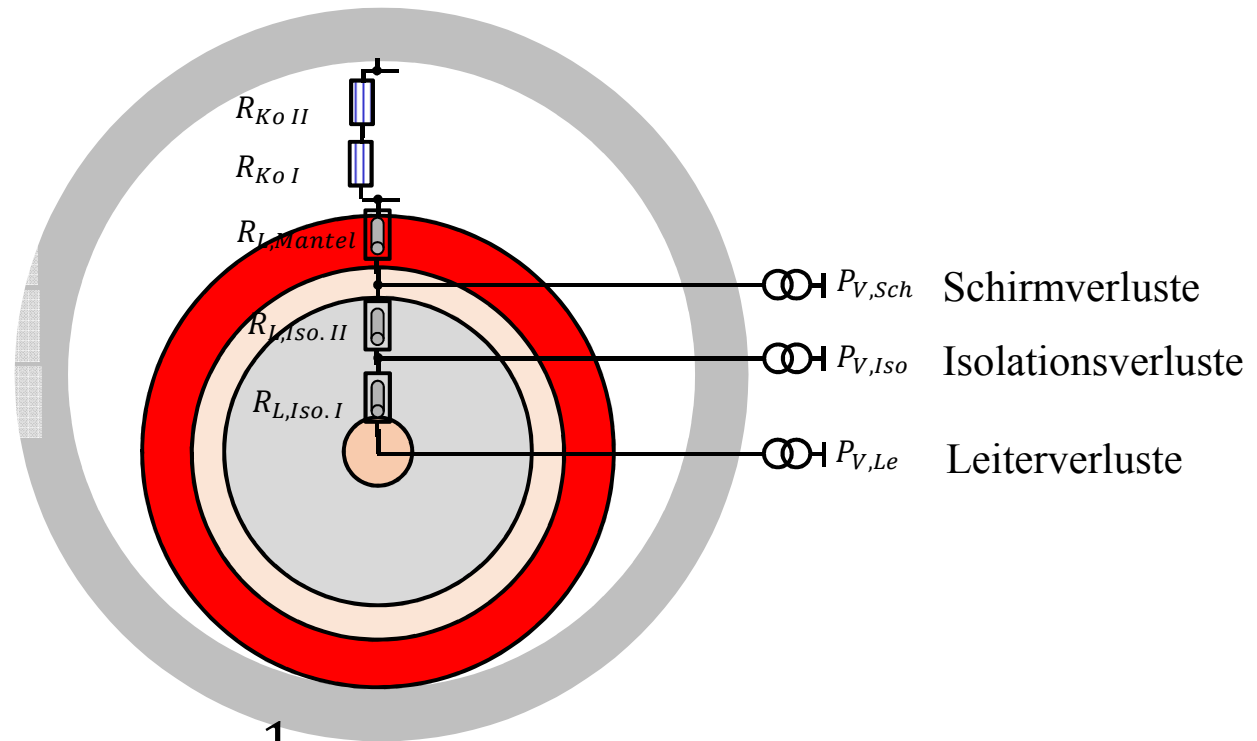
3 Thermisches Netzwerk Erdverlegter Kabel

Konvektionswiderstände

Mantelwiderstand

Isolationswiderstand (I)

Isolationswiderstand (II)



$$R_{KoI} = \frac{1}{\alpha_{K_I} \cdot O_{K_I}} \quad R_{KoII} = \frac{1}{\alpha_{K_{II}} \cdot O_{K_{II}}}$$

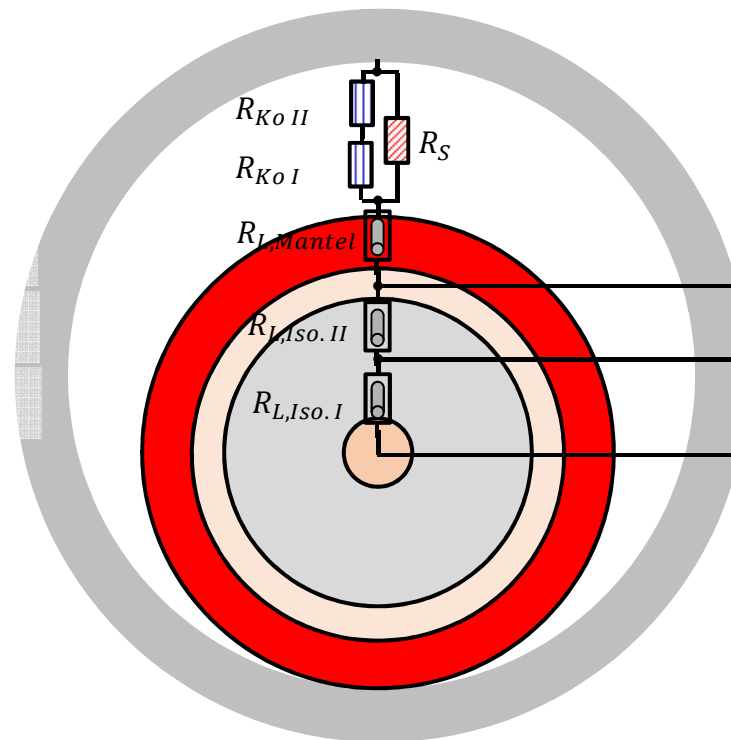
3 Thermisches Netzwerk Erdverlegter Kabel

Konvektionswiderstände

Mantelwiderstand

Isolationswiderstand (I)

Isolationswiderstand (II)



Strahlungswiderstand

$P_{V,Sch}$ Schirmverluste

$P_{V,Iso}$ Isolationsverluste

$P_{V,Le}$ Leiterverluste

$$R_S = \frac{1}{\alpha_S \cdot O_S}$$

3 Thermisches Netzwerk Erdverlegter Kabel

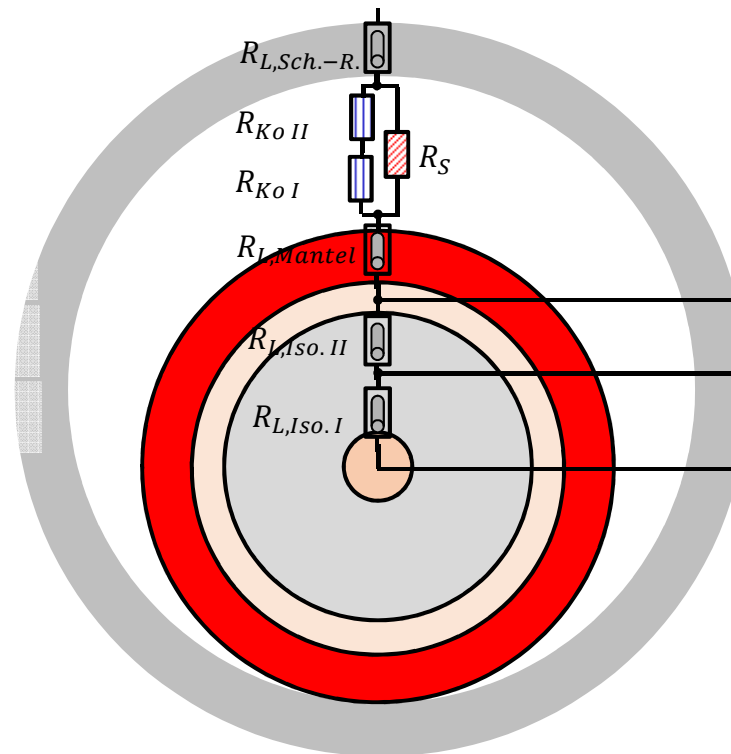
Schutzrohrwiderstand

Konvektionswiderstände

Mantelwiderstand

Isolationswiderstand (I)

Isolationswiderstand (II)



Strahlungswiderstand

$P_{V,sch}$ Schirmverluste

$P_{V,Iso}$ Isolationsverluste

$P_{V,Le}$ Leiterverluste

$$R_{L,Sch.-R.} = \frac{\ln \frac{r_{a_R}}{r_{i_R}}}{\lambda_R \cdot 2\pi \cdot l}$$

3 Thermisches Netzwerk Erdverlegter Kabel

Erdreichwiderstand

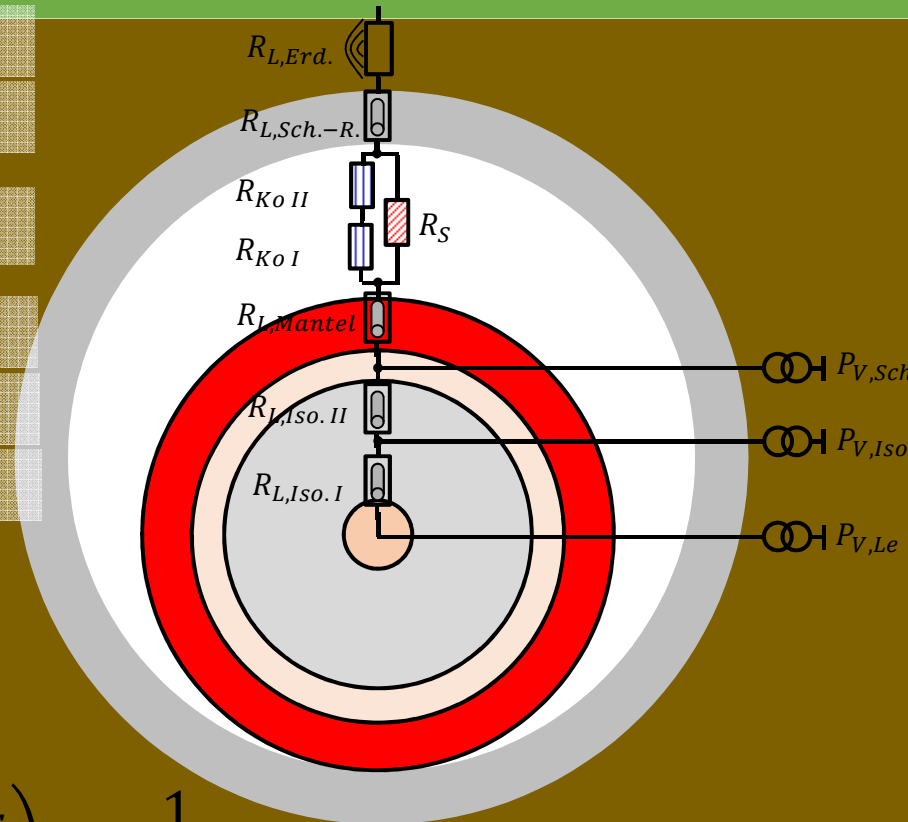
Schutzrohrwiderstand

Konvektionswiderstände

Mantelwiderstand

Isolationswiderstand (I)

Isolationswiderstand (II)



Strahlungswiderstand

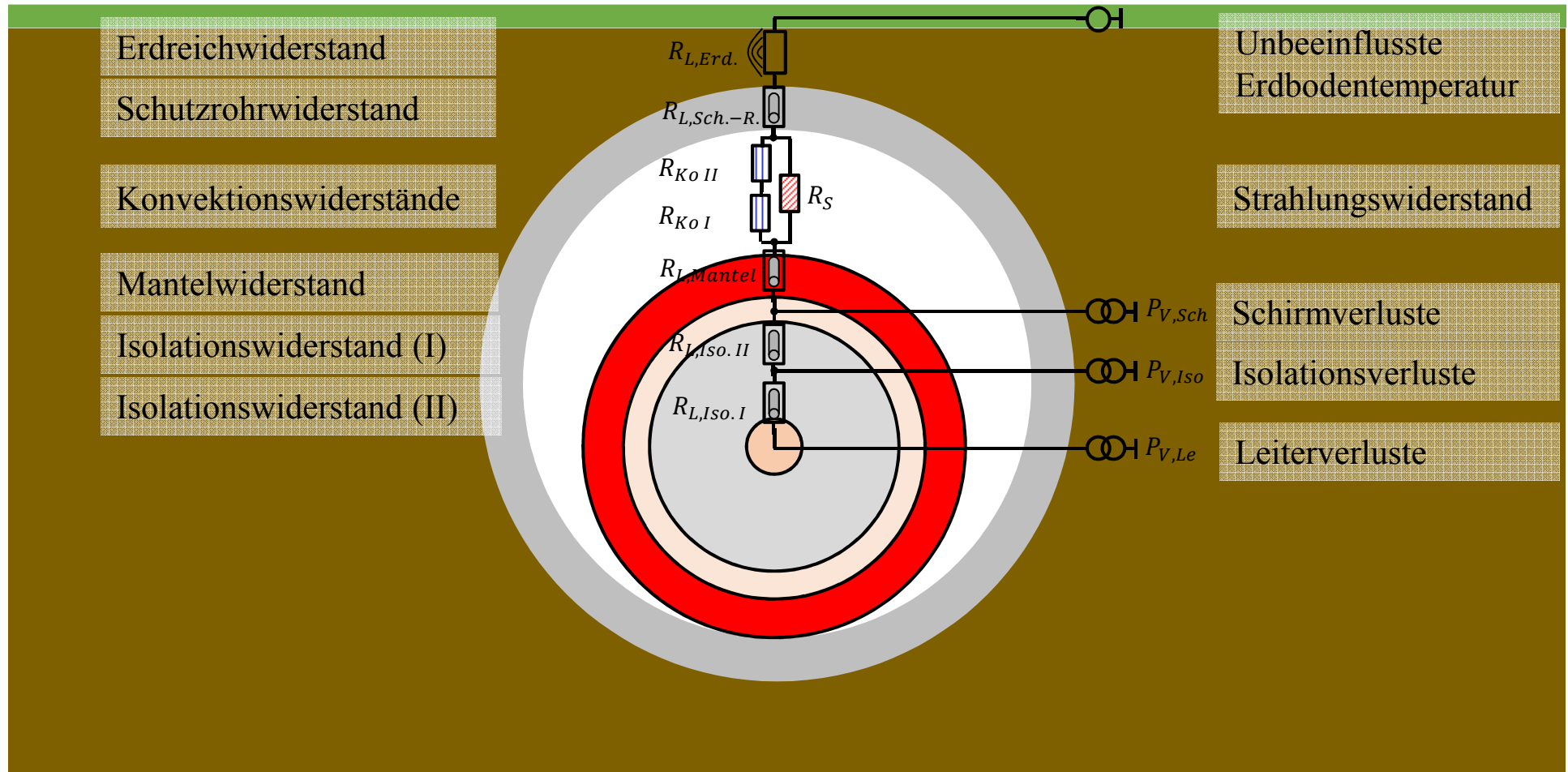
Schirmverluste

Isolationsverluste

Leiterverluste

$$R_{L,Erd.} = \frac{\Delta\vartheta_G}{P_L} \left(1 - \frac{\lambda_F}{\lambda_T} \right) + \frac{1}{2\pi\lambda_T} \ln E$$

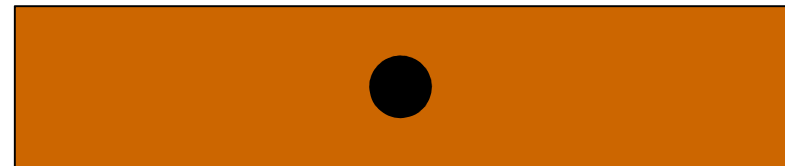
3 Thermisches Netzwerk Erdverlegter Kabel



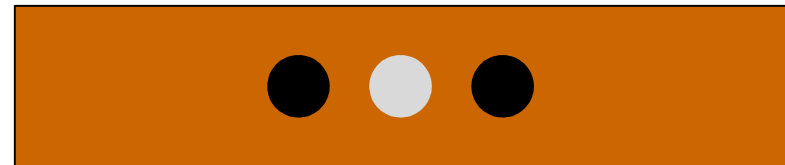
3 Thermisches Netzwerk Erdverlegter Kabel

$$R_{L,Erd.} = \frac{\Delta\vartheta_G}{P_L} \left(1 - \frac{\lambda_F}{\lambda_T} \right) + \frac{1}{2\pi\lambda_T} \ln E$$

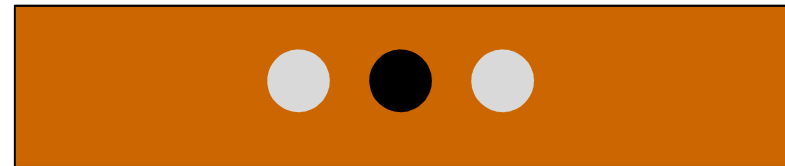
$$E = \frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}$$



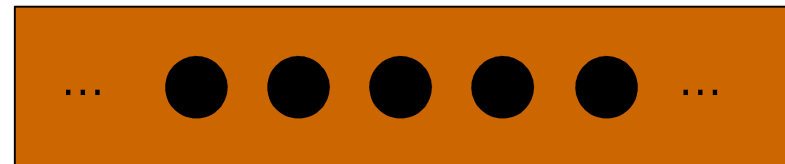
$$E = \frac{2h}{r} \left(1 + 4 \left(\frac{h}{a}\right)^2 \right) \left(1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2 \right)$$



$$E = \frac{2h}{r} \left(1 + 4 \left(\frac{h}{a}\right)^2 \right)$$



$$E = \frac{a}{\pi r} \sinh \left(\frac{2\pi h}{a} \right)$$



3 Thermisches Netzwerk Erdverlegter Kabel

Problem:

$$\lambda_{E_F} \neq \lambda_{B_F}$$

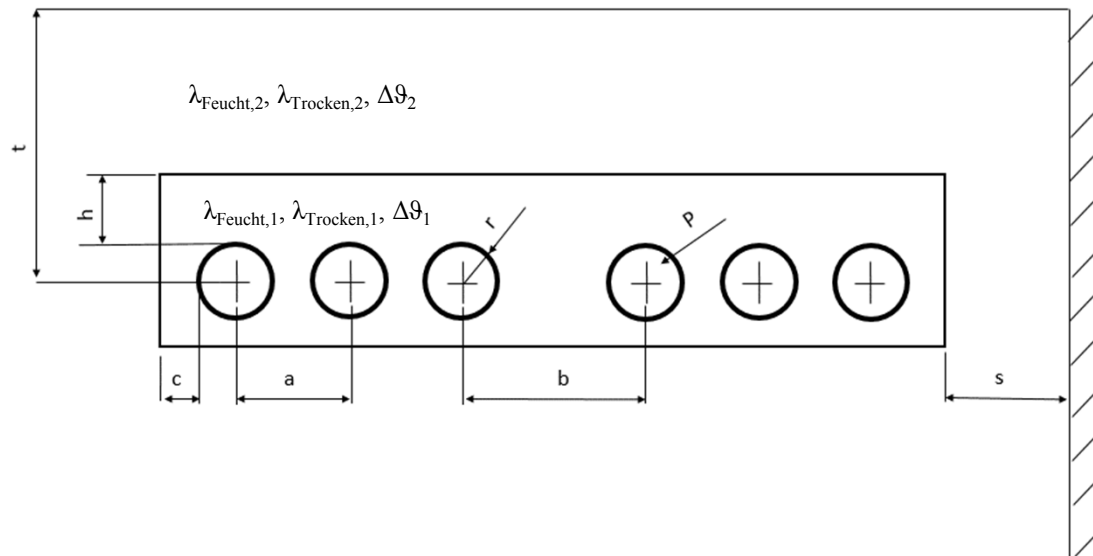
$$\lambda_{E_T} \neq \lambda_{B_T}$$

$$\Delta\vartheta_{G,E} \neq \Delta\vartheta_{G,B}$$

Lösung:

Approximation mittels statistischer Versuchsplanung (DoE)

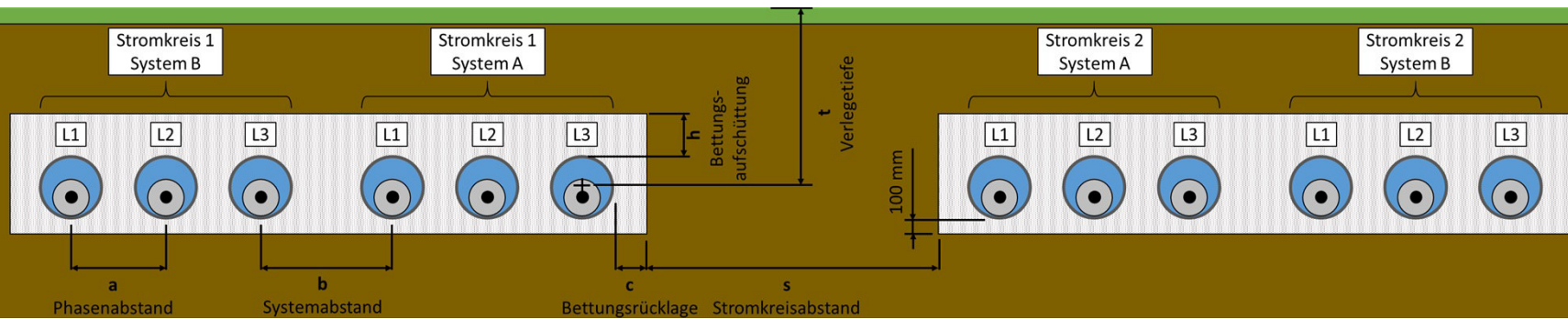
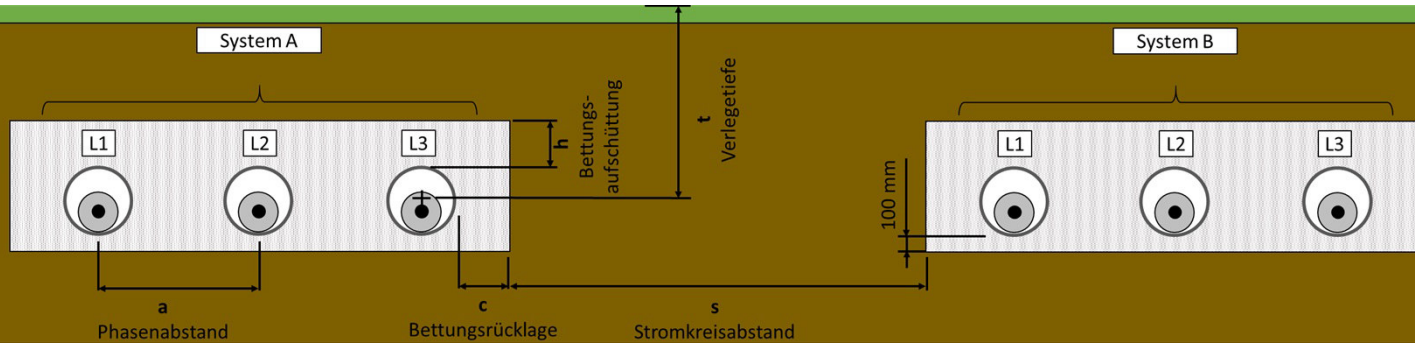
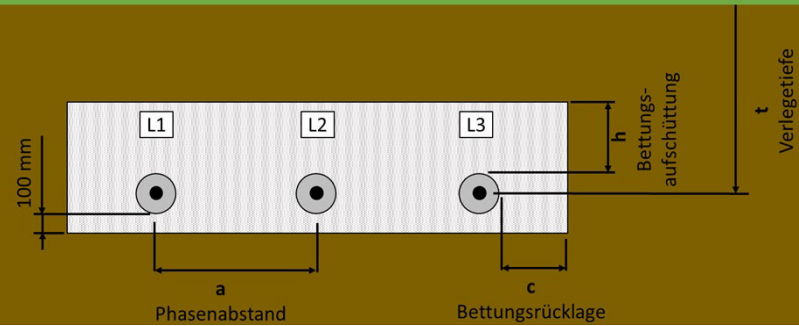
4 Statistische Versuchsplanung (DoE)



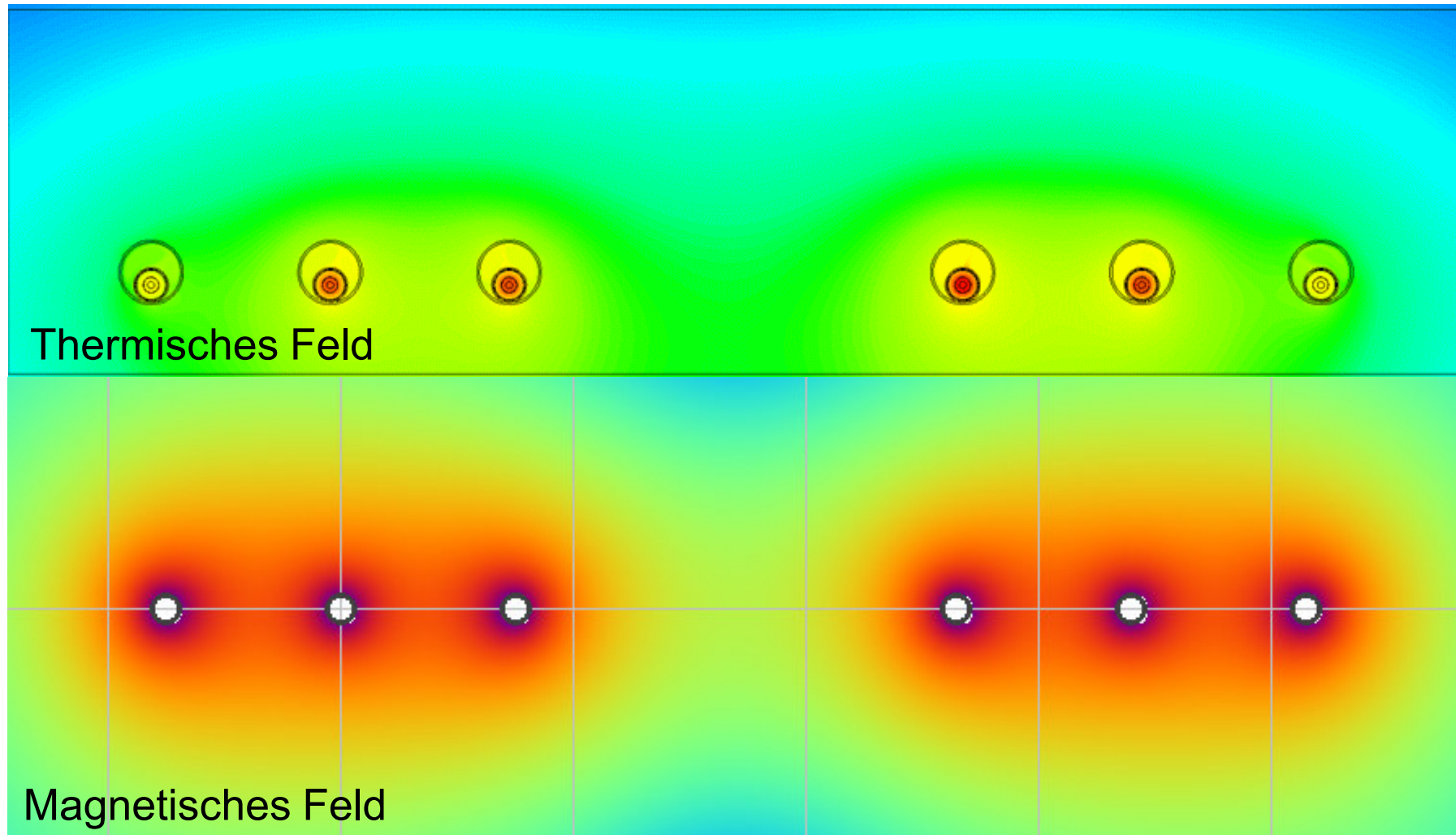
≈ 100.000 Simulationen

Nr.	Parameter		Bedeutung
1	A	P'	Leistungsbelag
2	B	$\lambda_{\text{Feucht},1}$	Wärmeleitfähigkeit feuchtes Bettungsmaterial
3	C	$\lambda_{\text{Trocken},1}$	Wärmeleitfähigkeit trockenes Bettungsmaterial
4	D	$\Delta\theta_1$	Grenzüber Temperatur Austrocknung
5	E	$\lambda_{\text{Feucht},2}$	Wärmeleitfähigkeit feuchtes Erdreich
6	F	$\lambda_{\text{Trocken},2}$	Wärmeleitfähigkeit trockenes Erdreich
7	G	$\Delta\theta_2$	Grenzüber Temperatur Erdreich
8	H	d	Außendurchmesser Leerrohr/Kapsel
9	I	t	mittlere Verlegetiefe
10	J	h	Bettungsaufschüttung über Leerrohr/Kapsel
11	K	a	Phasenabstand
12	L	b	Teilsystemabstand
13	M	s	Systemabstand
14	N	c	Bettungsrücklage

4 Statistische Versuchsplanung (DoE)



5 Softwaretechnische Umsetzung



5 Softwaretechnische Umsetzung

Berechnungsprogramm zur Kabeldimensionierung

Datei Bearbeiten Hilfe
 Einfaehsystem Doppelsystem Vierersystem

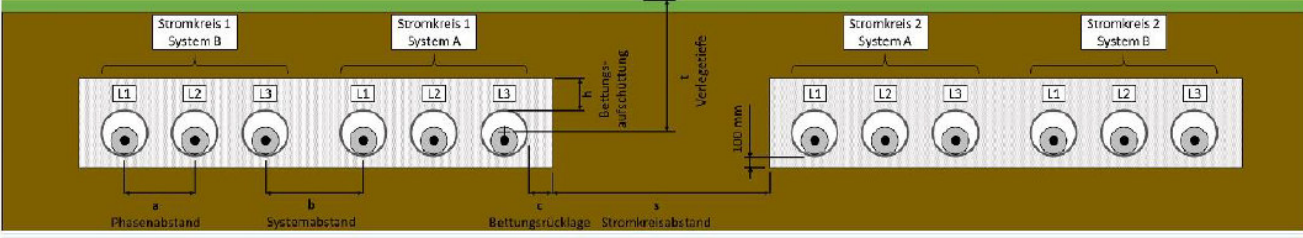
Leiterdaten
 Leiterquerschnitt: 2500 mm²
 Leiterdurchmesser: 63,7 mm
 Widerstandsbelag des Kabels bekannt? ja nein
 spez. elektr. Widerstand bei 20 °C: 0,0178 Ω*mm²/m
 Skineffektfaktor:
 vollständiger Millikenleiter unvollständiger Millikenleiter
 kein Millikenleiter freier Faktor
Isolations- und Manteldaten
 Außendurchmesser Isolierung: 127,5 mm
 Wärmeleitfähigkeit Isolierung: 0,4 W/(m*K)
 Betriebsspannung: 400 kV
 Kapazitätsbelag des Kabels: 230 pF/m
 Außendurchmesser Mantel: 145 mm
 Wärmeleitfähigkeit Mantel: 0,4 W/(m*K)
Schirmbehandlung
 Schirmquerschnitt: 240 mm²
 Schirm ausgekreuzt / offen Schirm durchverbunden

Verlegungsart
 direkte Erdverlegung
 Verlegung in Schutzrohr
 Innendurchmesser Schutzrohr: 230 mm
 Außendurchmesser Schutzrohr: 250 mm
 Wärmeleitfähigkeit Schutzrohr: 0,4 W/(m*K)
 Befüllung der Schutzrohre:
 mit Luft mit Wasser
 Emissionszahl Kabelmantel: 0,95
 Emissionszahl Schutzrohr: 0,95
Betriebsparameter
 Frequenz: 50 Hz
 Stromstärke: 1000 A
 gleichmäßige Stromaufteilung ungleichmäßige Stromaufteilung
Grenzparameter
 Maximale Leitertemperatur: 90 °C
 Maximale Manteltemperatur: 70 °C


Verlegegeometrie
 Verlegeliefe t: 1600 mm
 Phasenabstand a: 500 mm
 Systemabstand b: 1500 mm
 Bettungsrücklage c: 400 mm
 Bettungsaufschüttung h: 600 mm
 Stromkreisabstand s: 6000 mm
Erdreich- und Bettungsmaterial
 unbeeinflusste Erdbodentemperatur: 15 °C
 Wärmeleitfähigkeit Erdreich feucht: 1 W/(m*K)
 Wärmeleitfähigkeit Erdreich trocken: 0,4 W/(m*K)
 Grenzübertemperatur Erdreich: 15 K
 Wärmeleitfähigkeit Bettung feucht: 2 W/(m*K)
 Wärmeleitfähigkeit Bettung trocken: 1 W/(m*K)
 Grenzübertemperatur Bettung: 20 K

Berechnen Alles zurücksetzen Programm beenden

Projektname:
 Projektbeschreibung:
 Ergebnisnotiz:



960	1012	1046	1043	1011	961	Phasenstrom [A]	964	1012	1042	1041	1009	964
33,0	36,6	37,9	37,1	36,0	33,0	Leitertemperatur [°C]	33,1	36,1	37,0	37,6	36,4	33,2
29,9	33,2	34,3	33,5	32,6	29,8	Manteltemperatur [°C]	29,9	32,7	33,5	34,1	33,1	30,0
26,2	29,2	30,2	29,4	28,7	26,1	Schutzrohrtemperatur [°C]	26,2	28,7	29,4	30,0	29,1	26,3
11,68	12,66	13,30	13,23	12,62	11,69	Verlustleistungsbelag [W/m]	11,75	12,65	13,21	13,21	12,60	11,74


 Zentrum für
 angewandte Forschung
 und Technologie e.V.
 an der HTW Dresden

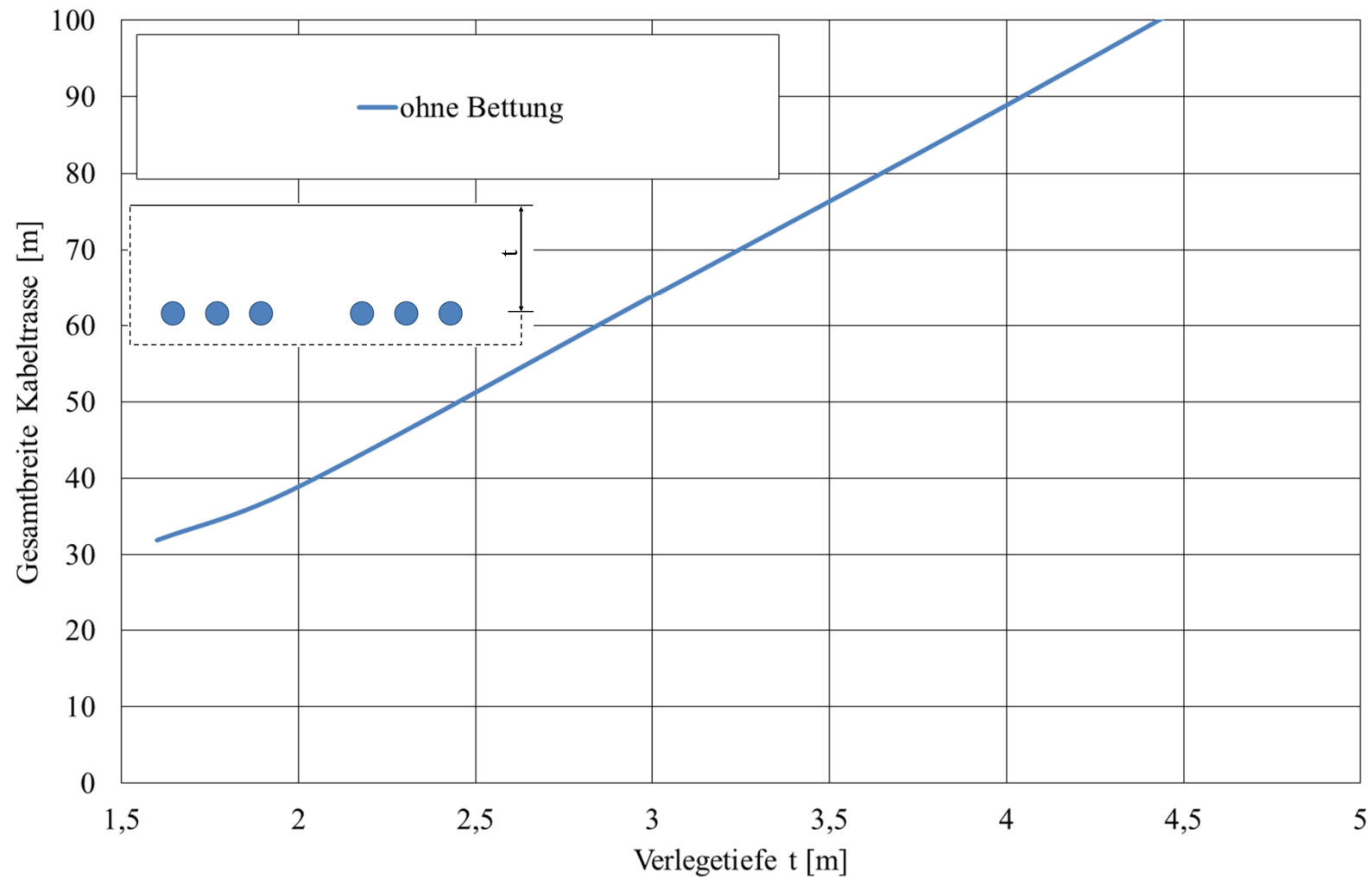
5 Softwaretechnische Umsetzung

- Keine analytische Gleichung
- Berechnung mit FEM
- Approximation mittels statistischer Versuchsplanung
- 2-Schichtenmodell des Erdbodens
- Elektro-thermische Verknüpfung inkludiert
- Modell der Stromverdrängung (Massivleiter, Millikenleiter)
- Schutzrohr
- Schirmbehandlung (offen/ausgekreuzt, durchverbunden)
- AC, DC, Drehstrom

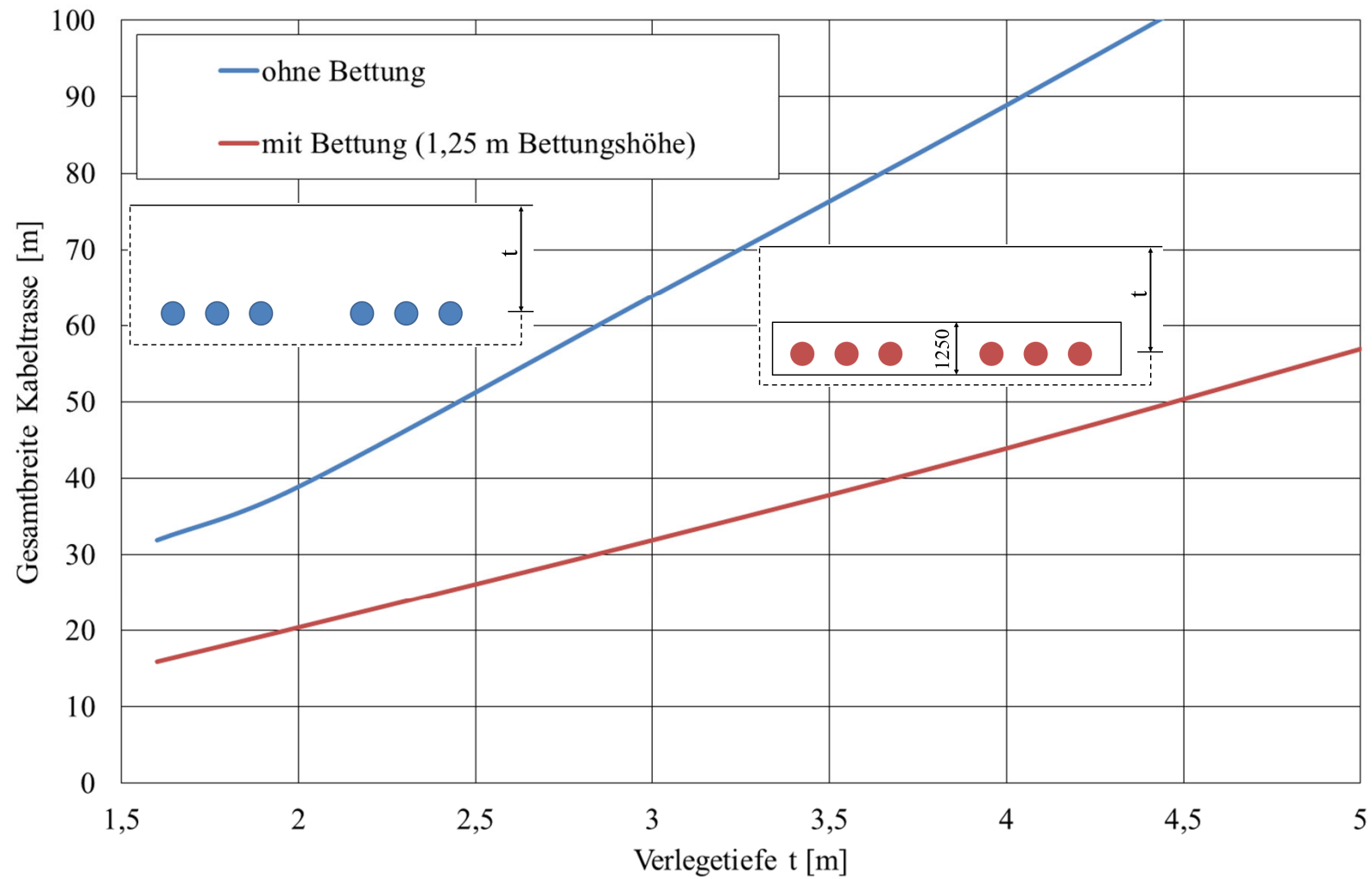
6 Variationsrechnungen

Boden	Stromtragfähigkeit pro Stromkreis (A)	Scheinleistung des Gesamtsystems (MVA)	Verhältnis (%)
VDE-Sand	2.702	3.557	100
Sandiger Boden	3.230	4.252	120
Flüssigboden (Lößlehm) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	3.350	4.410	124
Flüssigboden (Rotlagenkies) mit Bentonit	3.588	4.723	133
Flüssigboden (Rotlagenkies) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	3.540	4.660	131
Flüssigboden (Mergel) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	3.430	4.515	127
Flüssigboden (Sand) mit thermisch stabilisiertem Bentonit	3.506	4.615	130
DuoFill	3.596	4.734	133
Sandmischung (HeidelbergCement)	3.328	4.381	123
Mibau Granodiorit	3.244	4.270	120
Mibau Quarzdiorit	3.552	4.675	131
Köster-ThermBett	3.688	4.854	136

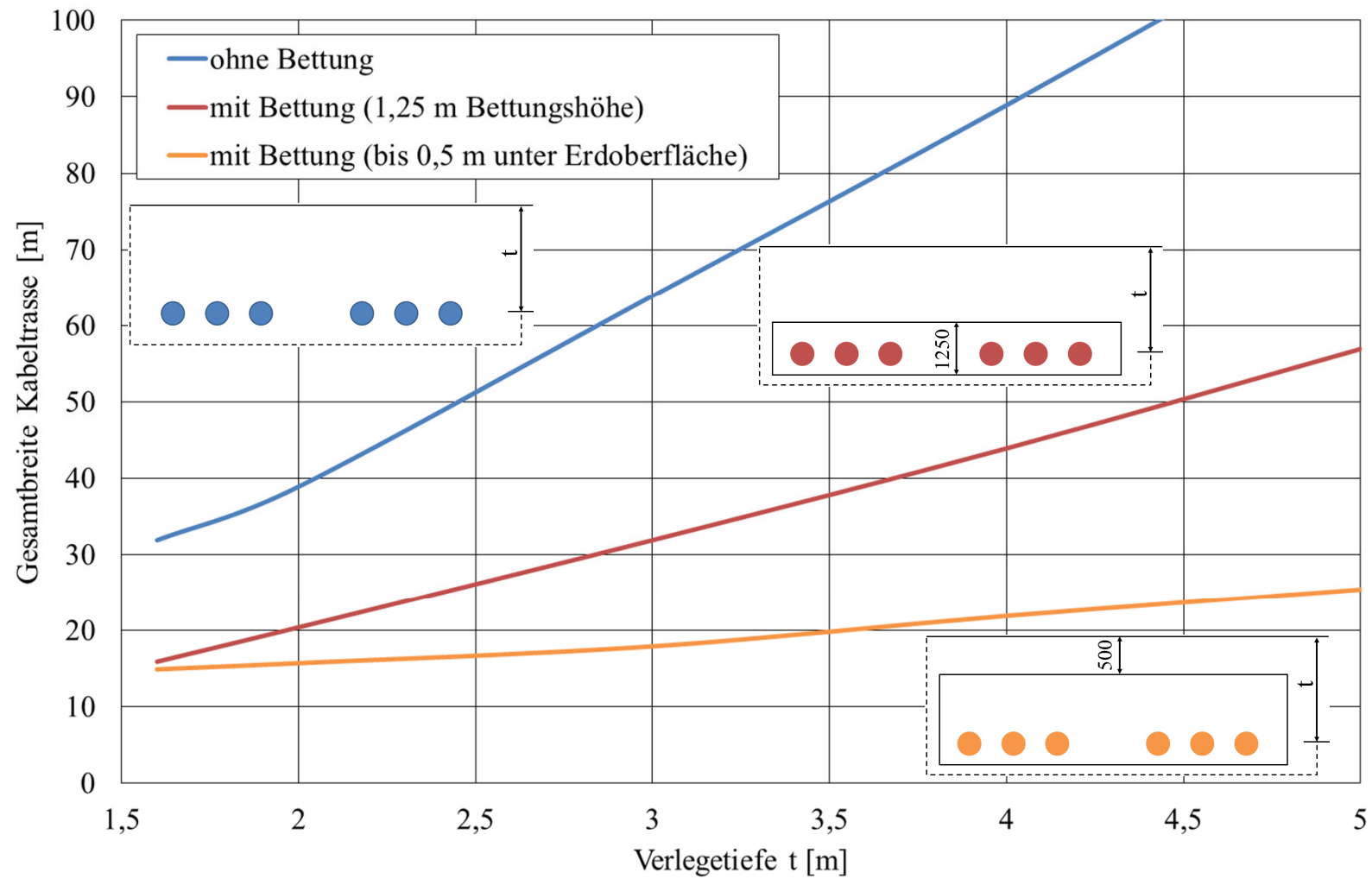
6 Variationsrechnungen



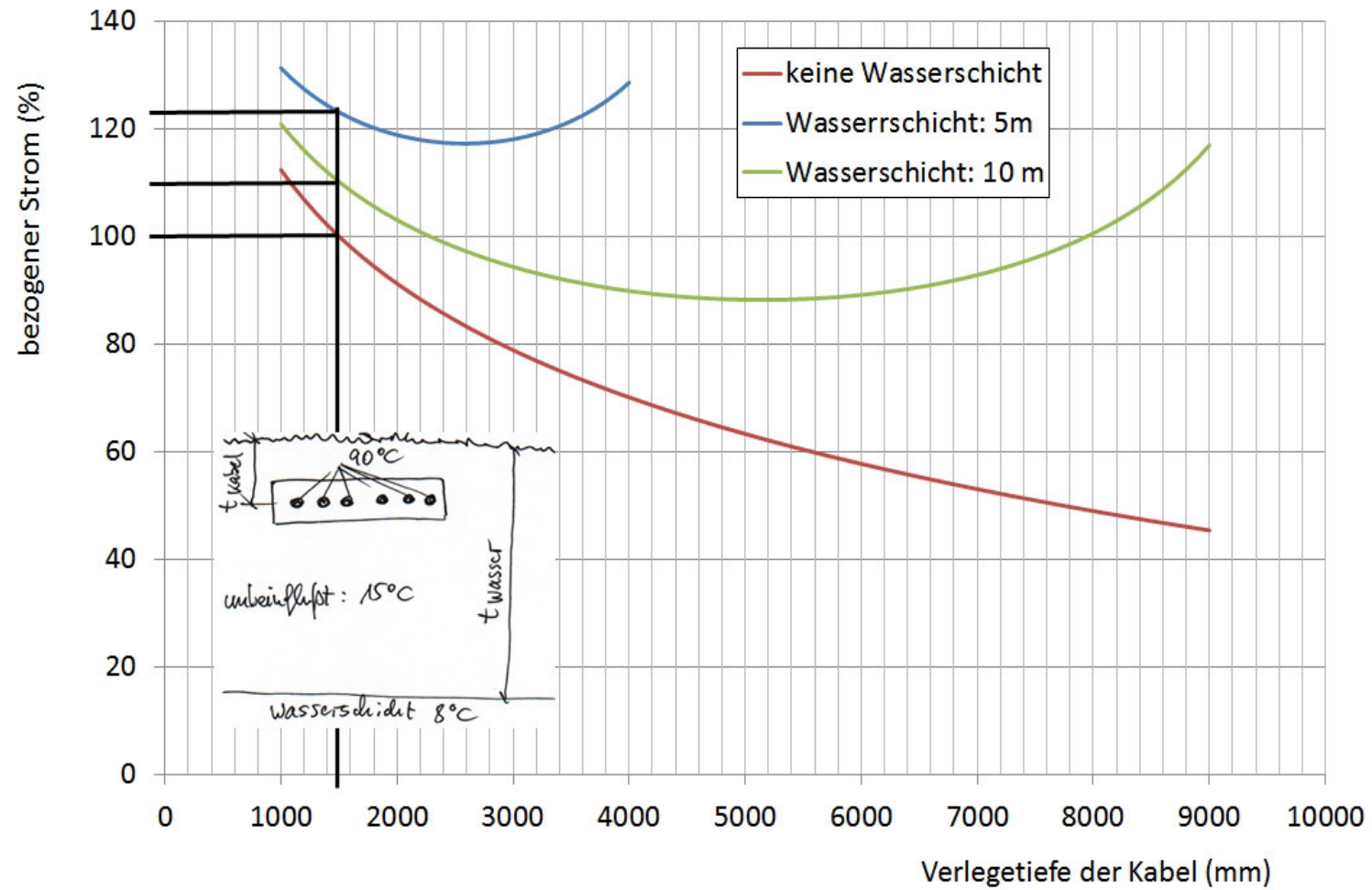
6 Variationsrechnungen



6 Variationsrechnungen



6 Variationsrechnungen



**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**