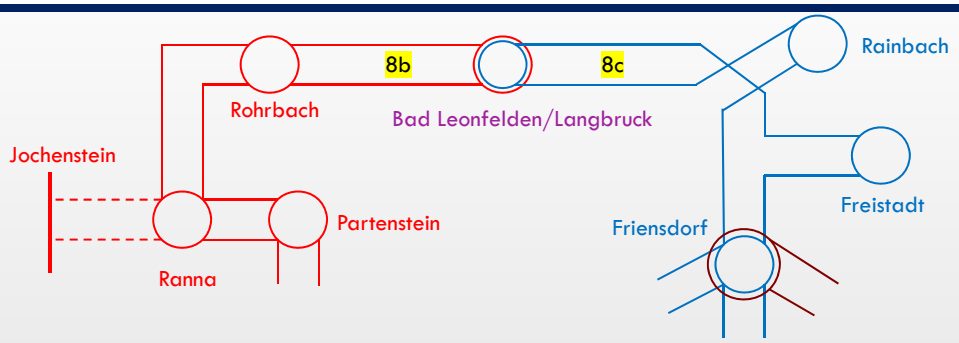
Machbarkeitsstudie für eine innovative und kostenoptimierte Erdkabellösung im Mühlviertel

Prof.-Dr. H. Brakelmann

Dr.-Ing. M. Pöller

Einleitung



- Gemäß Masterplan 2026 und Masterplan 2028 sollen zur Anbindung des neuen 110kV UW Bad Leonfelden/Langbruck die beiden Doppelleitungen 8b und 8c errichtet werden.
- Die IG Mühlviertel setzt sich aus Gründen des Landschaftsschutzes für eine Erdkabellösung ein.
- Dieses Gutachten weist die technische Machbarkeit einer Erdkabellösung im Mühlviertel nach und schätzt die Kosten ab.

Planungsgrundsätze

Netzzuverlässigkeit – N-1-Sicherheit

- 110kV-Netze werden so geplant, dass eine unterbrechnungsfreie N-1 Sicherheit der Versorgung aller Verbraucher gewährleistet werden kann.
- N-1-Sicherheit bedeutet, dass bei Ausfall eines beliebigen Betriebsmittels der Netzbetrieb unterbrechnungsfrei, ohne Beeinträchtigungen fortgeführt werden kann.
- Verbraucher-UWs müssen somit immer N-1-sicher angebunden werden
- Erzeugungsanlagen müssen nicht N-1-sicher angebunden werden.

Netzzuverlässigkeit – Fehlerarten

- **Einfachausfall:** Ausfall eines einzigen Betriebsmittels, z.B. eines Leitungssystems einer Doppelleitung oder eines Transformators.
- **Unabhängier Mehrfachausfall:** Gleichzeitiger Ausfall mehrerer Betriebsmittel aufgrund unterschiedlicher (stochastisch unabhängiger) Ursachen. Beispiel: gleichzeitiger Ausfall einer Leitung und eines Transformators.
- **Common Mode Fehler:** Ausfall mehrerer Betriebsmittel aufgrund gemeinsamer Ursache, z.B. Ausfall beider Système einer Doppelleitung aufgrund von Mastbruch oder Zerstörung paralleler Kabel, die im gleichen Graben verlegt sind.

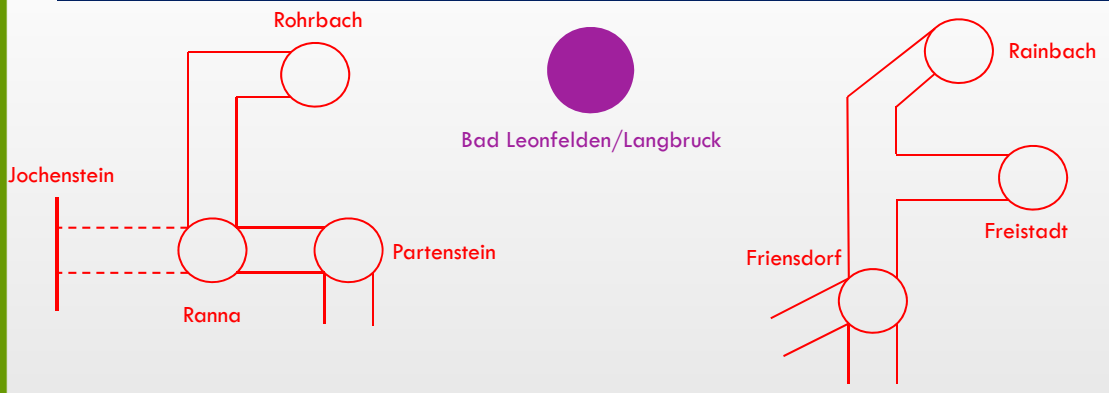
Beispiele für Common Mode Fehler

Mastumbruch nach Kollision
BFU-Bericht 19.08.2006; 7 verletzte Personen; Stromausfall

Sturm Fabienne knickt 110-kV-Masten bei Mommenheim südlich Mainz am 24.09.2018 F. Stoffers, Rechtsanwalt, Mainz (Quelle: Fabian Stoffers, Rechtsanwalt für Arbeitsrecht, Mainz)

Anbindungsvarianten

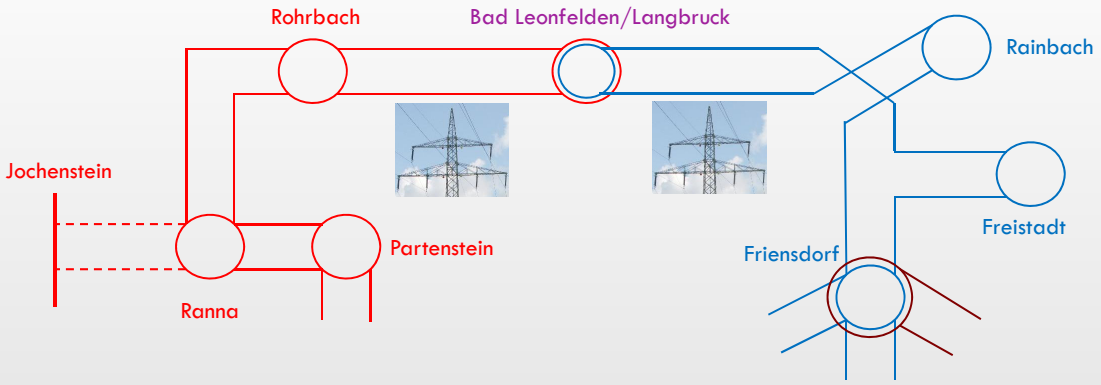
Ziel der Ausbaumaßnahmen im Mühlviertel



Ziel der Ausbaumaßnahmen:

- Stärkung der Versorgung in der Gegend um Bad Leonfelden/Langbruck
- Erhöhung der Verfügbarkeit der UWs Rohrbach, Rainbach und Freistadt (derzeit nicht gegen Common Mode Fehler abgesichert)

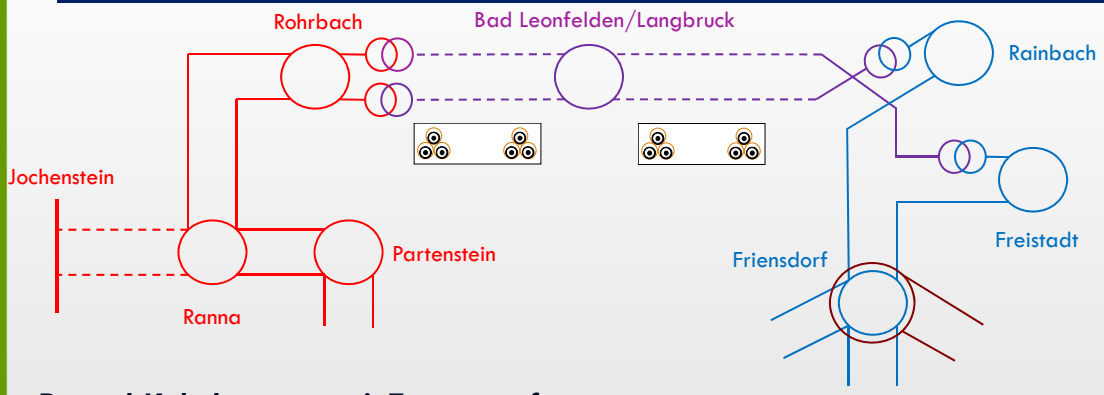
Variante OHL - Freileitungsvariante



Freileitungsvariante (gemäß Masterplan 2026/2028):

- Anbindung von Bad Leonfelden/Langbruck über zwei Doppelleitungen
- Netzauftrennung in Bad Leonfelden/Langbruck (Trennstelle, normal offen)

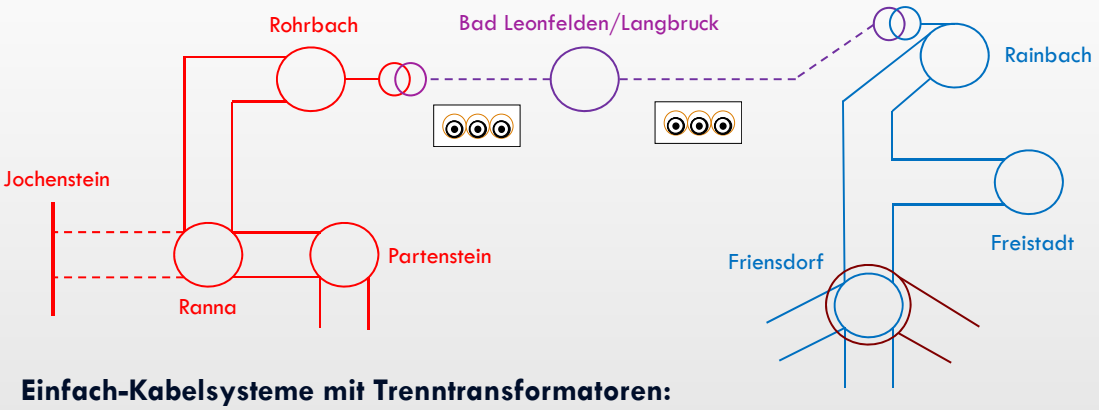
Variante 6K – Doppel-Kabelsysteme



Doppel-Kabelsysteme mit Trenntransformatoren:

- Anbindung von Bad Leonfelden/Langbruck über zwei Doppel-Kabelsysteme.
- Trennstelle in Bad Leonfelden/Langbruck kann geschlossen werden, da Netzauftrennung (im Nullsystem) über Trenntransformatoren erfolgt.

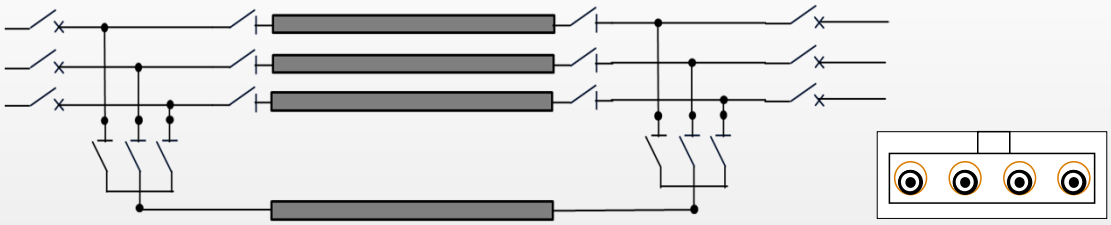
Variante 3K – Einfach-Kabelsysteme



Einfach-Kabelsysteme mit Trenntransformatoren:

- Anbindung von Bad Leonfelden/Langbruck über zwei Einfach-Kabelsysteme.
- Anbindung von Bad Leonfelden/Langbruck im geschlossenen Ring stellt N-1-Sicherheit her.

Variante 4K – Einfach-Kabelsysteme mit Reservekabel („PowerTubes“)



Einfach-Kabelsysteme mit Reservekabel („PowerTubes“):

- Zur zusätzlichen Absicherung im Fall von einphasigen Unterbrechungen wird ein zusätzliches Kabel als Reservekabel verlegt.
- Im Fall eines Fehlers auf einem aktiven Kabel wird das beschädigte Kabel getrennt und das Reservekabel über einpolige Trennschalter auf die unterbrochene Phase geschaltet.
- Ergebnis: Steigerung der Verfügbarkeit durch Reduzierung der Unterbrechnungsdauer.

Kabeldimensionierung

Trassenführung

größte Kabel-Trassenlänge:	51 km
geringste Kabel-Trassenlänge:	41 km
Freileitungs-Trassenlänge:	40 km

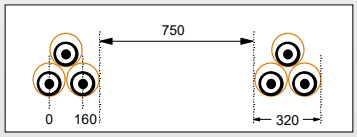
Basisvariante mit
Kabeltrassenlänge 45 km

Kabelquerschnitt und Verlegung

benötigt werden Kabel mit Al-Leitern 1200 sqmm

offene Bauweise (Graben)

Pflugverlegung der Leerrohre

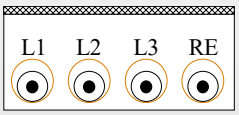


Kabel-Doppelsystem 2*200 MVA

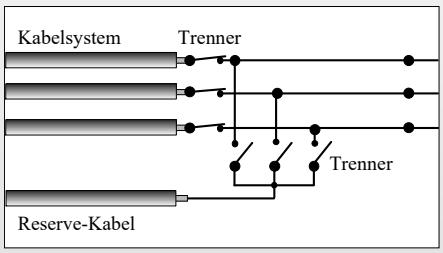
1 Kabelsystem 1*200 MVA

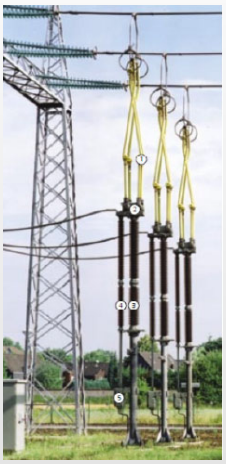
Reservekabel („PowerTubes“)

Erhöhung der Verfügbarkeit durch PowerTubes



Kabelsystem mit Reservekabel



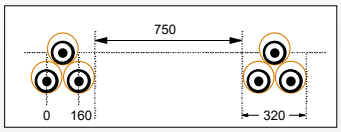


Randbedingung der Kabelauslegung

- N-1 sichere Übertragungskapazität: 200MVA (analog zur geplanten Freileitung)
- Maximale Stromtragfähigkeit: 1050A/200MVA bei EVU-Lastverlauf
- Tatsächlich erforderliche Maximalleistung:
  Versorgung von Bad Leonfelden/Langbruck, Rainbach und Freistadt bei Ausfall der Doppelleitung Friensstadt-Freistadt: ca. **120MW**

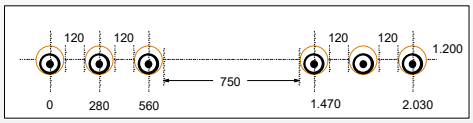
Kabel ist mit einer übertragbaren Leistung von 200 MVA (N-1 sicher) mehr als ausreichend dimensioniert; keine partielle Bodenaustrocknung (BA), Bodenerwärmung/Rohroberfläche < 10°C

Verlegeanordnungen Variante 6K



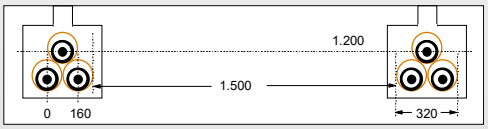
„GS2D“: 2 Systeme, gebündelt verlegt, Graben

2x182,3 MVA/2x203,5 MVA



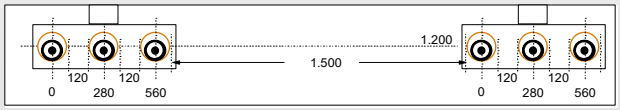
„GS2WF“: 2 Systeme, Einebenenanordnung, Graben

2x188,6 MVA/2x208,4 MVA



„PS2D“: 2 Systeme, gebündelt, Pflug

2x190,3 MVA / 2x212,4 MVA)



„GS2WF“: 2 Systeme, Einebenenanordnung, Pflug

2x206,7 MVA/ 2x228,4 MVA

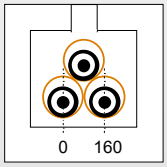
Verlegeanordnungen Variante 3K

„G1S“: 1 System, gebündelt, Graben , *B* = 0,75 m

1x202,7 MVA/2x220,0 MVA

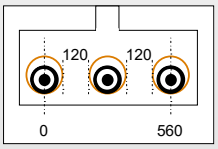
„G1SFW“: 1 System, Einebenenanordnung, Lücke 0,12 m, Graben , *B* = 0,90 m

1x217,0 MVA/2x230,7 MVA



„P1DRE“: 1 System mit RE, gebündelt verlegt, Pflug

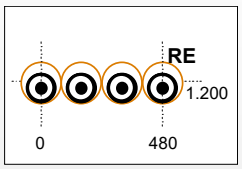
1x202,7 MVA/2x220,0 MVA



„P1SWRE“: 1 System, Einebenenanordnung, Lücke 0,12 m, Pflug

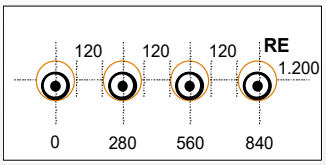
1x217,0 MVA/2x230,7 MVA

Verlegeanordnungen Variante 4K



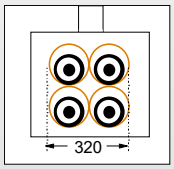
„G1SFDRE“: 1 System mit RE, Einebenenanordnung, Graben

1x205,5MVA/2x221,6MVA



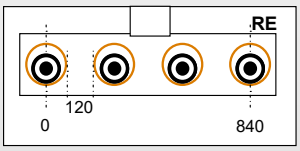
„G1SFWRE“: 1 System mit RE, Einebenenanordnung, Graben

1x217,0 MVA/2x230,7MVA



„P1DRE“: 1 System mit RE, gebündelt, Pflug

1x202,7 MVA/2x220,0 MVA



„P1SWRE“: 1 System, Einebenenanordnung, Pflug

1x217,0 MVA/2x230,7MVA

Einpflügen von Leerrohren

Einpflügen der Leerrohre: 500 m/Tag, 50…60 % Kosten

Pflugverlegung, hier: 2 Trassen à drei 150-kV-Kabel (s = 0,3 m), 2 LWL-Kabel, Abdeckplatten

Trassen mit Baustrasse, wie links, aber: 1 Woche nach Einpflügen

Kosten

Varianten und Kostenbasis

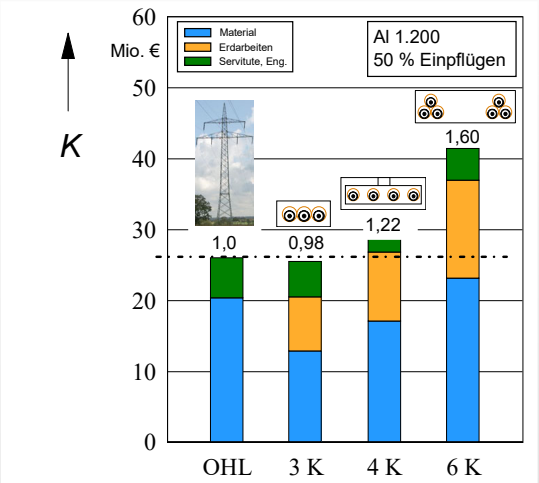
Untersuchungsumfang:

- 2 Kabelkonstruktionen Al-Leiter 1.600 sqmm und **1.200 sqmm**
- > 20 Legeanordnungen, mit und ohne partielle Bodenaustrocknung
- 3 Trassenlängen (41 km, **45 km**, 51 km)
- 3 Varianten zum Trassenanteil Pflugverlegung (**50 %**; 75 %; 90 %)
- 3 Systemvarianten (2 Kabelsysteme, 1 Kabelsystem, 1 Kabelsystem mit Reservekabel)
- 3 Varianten Freileitungskosten (600 €/m, **650 €/m**, 700 €/m)
- Netzausausbarbeiten (Trenntransformatoren, Erweiterung/Neubau von UWs

Kostenbasis:

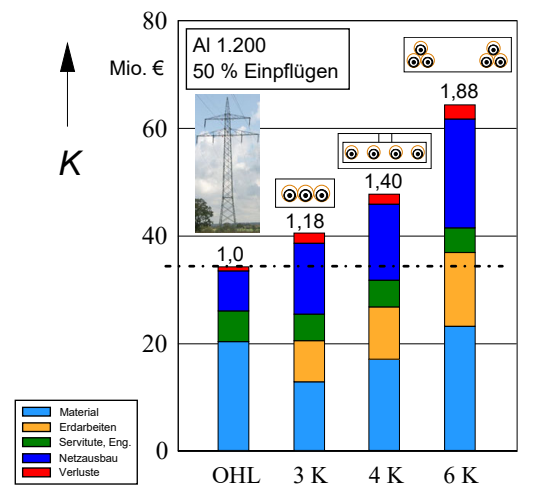
- Kabel: aktuelle Richtpreise, 2 Kabellieferanten
- Graben, Pflug, Bohrungen: aktuelles Angebot IFK (Juni 2019)
- Umspannwerke Planung der Umspannwerke und Preise aus realisierten Projekten (ca. 50 UWs) bzw. Herstelleranfragen (Trenntrafos)

Investitionskosten ohne Netzausbaumaßnahmen

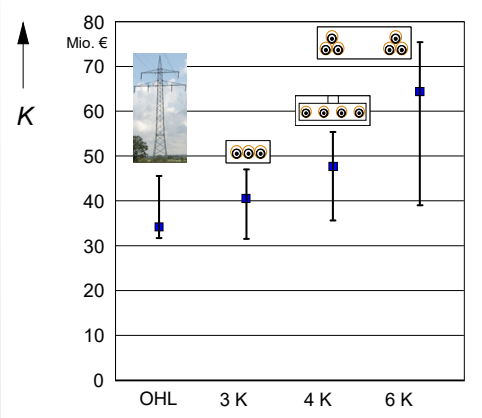


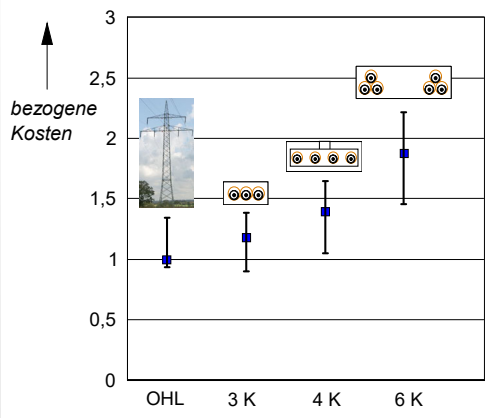
Kapitalwerte einschl. Netzausbau und Verluste

Kosten in €	OHL	6K	3K	4K
Umbau Rohrbach	1.175.839	5.562.735	2.989.844	3.300.000
Neubau Langbruck	6.367.578	8.500.251	6.774.326	7.300.000
Umbau Rainbach	50.000	2.890.989	3.389.626	3.500.000
Umbau Freistadt		2.853.446		
Mastaustausch Kabelanbindung		450.000		
Gesamtkosten UW, einschl. Trenntrafos	**7.593.417**	20.257.421	13.153.798	14.100.000
Kabel/Freileitung Material/Montage	20.400.000	23.137.000	12.854.000	17.139.000
Kabel/Freileitung Erdarbeiten	-	13.860.000	7.637.000	9.683.000
Kabel/Freileitung Engin.+Servitute	5.600.000	4.500.000	5.000.000	5.000.000
Kabel/Freileitung gesamt	**26.000.000**	**41.497.000**	**25.492.000**	**31.822.000**
Investitionskosten gesamt	**33.593.417**	**61.754.421**	**38.644.798**	**45.922.000**
Investkostenfaktor IKF	**1,0**	**1.84**	**1,15**	**1,37**
Kapitalwert Betriebskosten	718.744	2.748.021	1.985.629	1.985.629
Kapitalwert gesamt	**34.312.161**	**64.502.442**	**40.630.427**	**47.907.629**
Mehrkosten	-	30.190.281	6.318.266	13.595.462
Gesamtkostenfaktor GKF	**1,0**	**1,88**	**1,18**	**1,40**



Kostenspanne

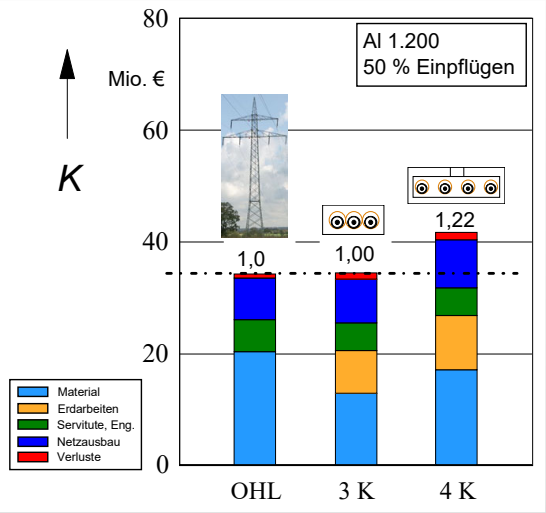




Ergebnis: Kostenbereiche der Freileitungslösung und der vorgeschlagenen Kabelvariante (3K) sind ähnlich

Kosten ohne Trenntrafos (z.B. bei Umstellung auf NOSPE)

Kosten in €	OHL	N-3K	N-4K
Umbau Rohrbach	1.175.839	540.755	639.608
Neubau Langbruck	6.367.578	6.774.326	7.300.000
Umbau Rainbach	50.000	444.738	700.000
Umbau Freistadt			
Mastaustausch Kabelanbindung			
Gesamtkosten UW, einschl. Trenntrafos	**7.593.417**	**7.759.819**	**8.639.608**
Kabel/Freileitung Material/Montage	20.400.000	12.854.000	17.139.000
Kabel/Freileitung Erdarbeiten	-	7.637.000	9.683.000
Kabel/Freileitung Engin.+Servitute	5.600.000	5.000.000	5.000.000
Kabel/Freileitung gesamt	**26.000.000**	**25.492.000**	**31.822.000**
Investitionskosten gesamt	**33.593.417**	**33.251.819**	**40.461.608**
Investkostenfaktor IKF	**1,0**	**0,99**	**1,37**
Kapitalwert Betriebskosten	718.744	1.161.007	1.61.007
Kapitalwert gesamt	**34.312.161**	**34.412.819**	**41.622.615**
Mehrkosten	-	6.318.266	13.595.462
Gesamtkostenfaktor GKF	**1,0**	**1,00**	**1,21**



Zuverlässigkeitsbewertung

Zuverlässigkeitskenngrößen

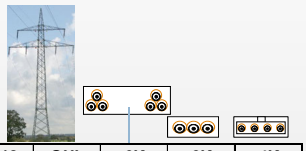
Eingabedaten

Beschreibung	Bezeichner	Häufigkeit	Einheit	Aus-Dauer	Einheit	Quelle
Einfachausfall Freileitung (kompensiert)	F1_FR	0,218	1/(100km a)	3,2	h	FNN FGH
Einfachausfall Freileitung (niederohmig)	F1_FN	0,683	1/(100km a)	3,0	h	FNN FGH
Einfachfausfall Kabel (einphasig)	F1_K1	0,080	1/(100km a)	72,0	h	CIGRE
Einfachausfall Kabelsystem (mehrphasig)	F1_K3	0,020	1/(100km a)	72,0	h	CIGRE
Einfachfehler Transformator	F1_TT	0,010	1/a	16,8	h	FNN FGH
Common-Mode Fehler Doppelleitung (kompensiert)	CM_FR	0,076	1/(100km a)	3,7	h	FNN FGH
Common-Mode Fehler Doppelleitung (niederohmig)	CM_FN	0,035	1/(100km a)	6,0	h	FNN FGH
Wartung Freileitung (und Schaltfeld)	W_FL	0,125	1/a	8,0	h	Simp Table 2-7
Wartung Kabel (und Schaltfeld)	W_K	0,500	1/a	4,0	h	Schätzung
Wartung Transformator (und Schaltfeld)	W_TT	0,250	1/a	8,0	h	Simp Table 2-7

Zeit für Schalthandlungen: 30min

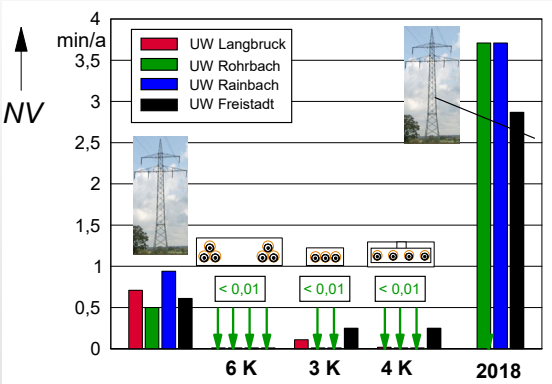
Ergebnisse der Zuverlässigkeitsbetrachtungen

UW Langbruck, Rohrbach, Rainbach, Freistadt



MTBF in a	2018	OHL	6K	3K	4K
Langbruck		42	>10000	>10000	>10000
Rohrbach	60	60	>10000	>10000	>10000
Rainbach	60	60	>10000	>10000	>10000
Freistadt	77	77	>10000	872	873

Mittlere Nichtverfügbarkeit in min/a	2018	OHL	6K	3K	4K
Langbruck		0,71	0,00	0,11	0,02
Rohrbach	3,71	0,50	0,00	0,00	0,00
Rainbach	3,71	0,94	0,00	0,01	0,00
Freistadt	2,87	0,61	0,00	0,25	0,25



Ergebnisse der Zuverlässigkeitsberechnungen

- Die Freileitungsvariante (OHL) reduziert die Unterbrechungsdauer der UWs Rohrbach, Rainbach und Freistadt. Aufgrund der offenen Trennstelle in Langbruck/Bad Leonfeld bleibt die Unterbrechungshäufigkeit von der Maßnahme jedoch unberührt.
- Unterbrechungshäufigkeiten und Nichtverfügbarkeiten aller Kabelvarianten liegen an allen UWs deutlich unter den Zuverlässigkeitskenngrößen aus Variante OHL.
- Selbst die Variante mit nur einem Kabel im geschlossenen Ring (Variante 3K) führt zu einer deutlich höheren Verfügbarkeit der Umspannwerke im Mühlviertel als die Freileitungsvariante gemäß Masterplan.

Kommentare zum Masterplan, Thema Sternpunkterdung und Netzauftrennung

Kommentare zum Masterplan

Aufgrund der zunehmenden Verkabelung im Raum Linz und dem Zubau von Freileitungen wird im bisherigen 110kV Netz des Zentralraums OÖ die Löschgrenze überschritten.

Optionen:

- Auftrennung in Teilnetze
- Einsatz von Trenntransformatoren zur Nullsystementkopplung (Netzseitige Trenntransformatoren)
- Umstellung des Netzes auf niederohmige Sternpunktbildung.

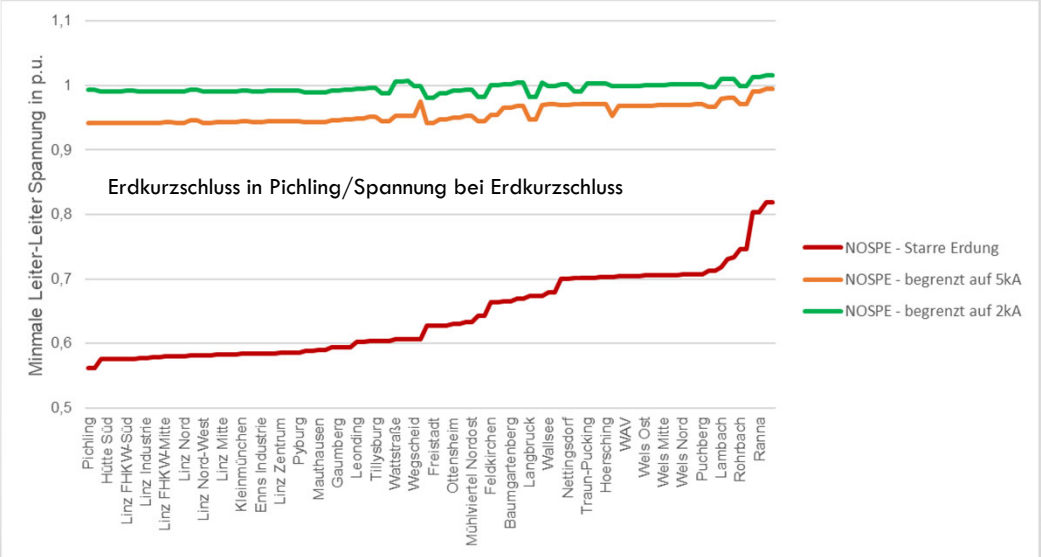
Spannungsqualität: Vergleich NOSPE-RESPE

- RESPE: Resonanzsternpunkterdung – keine Abschaltung von Leitungen bei Erdkurzschluss, keine Spannungseinbrüche bei einpoligen Fehlern
- NOSPE: Niederohmige Sternpunkterdung – Abschaltung von Leitungen bei Erdkurzschluss, üblicherweise mit AWE.

NOSPE – Varianten:

- Starre Erdung (z.B. Bayernwerk): hohe Erdkurzschlussströme (wie dreipolige Kurzschlüsse oder sogar höher), starke Spannungseinbrüche.
- NOSPE mit Strombegrenzung (z.B. Berlin): Strombegrenzung durch Widerstand oder Drossel, Erdkurzschlussströme im Bereich von 5kA-10kA: geringe Spannungseinbrüche (5%-10%)
- NOSPE mit starker Strombegrenzung („Mittelohmige Erdung“) – Strombegrenzung durch Widerstand oder Drossel, Erdkurzschlussströme im Bereich von 2kA

Einpolige Fehler – Netz OÖ 2026



Versorgungszuverlässigkeit NOSPE

- Bei Anwendung von NOSPE mit Strombegrenzung (5kA) verbleibt die Spannung beim Erdkurzschluss oberhalb von 90% der Nennspannung.
- Derartige Spannungseinbrüche haben auch auf Industriekunden praktisch keine Auswirkungen.
- Aufgrund der N-1-Sicherheit im 110kV Netz kommt es im Fall eines Erdkurzschlusses trotz möglicher Abschaltung von Leitungen zu keinen Versorgungsunterbrechungen.
- AWE verbessert die Zuverlässigkeit weiter.
- Aufgrund der höheren Vermaschung durch Verzicht auf Teilnetzbildung ist die Unterbrechungshäufigkeit üblicherweise geringer als bei RESPE mit Teilnetzbildung.

Folglich:
Keine Nachteile bzgl. der Versorgungszuverlässigkeit bei Netzen mit NOSPE (mit Strombegrenzung) im Vergleich zu Netzen mit RESPE.

Versorgungszuverlässigkeit NOSPE

Vorteile NOSPE

- (Nahezu) keine Einschränkungen bzgl. Kabelzubau und Netzausdehnung bei Betriebsart NOSPE.
- Bei Betriebsart NOSPE sind für Kabel keine Trenntransformatoren erforderlich. Betriebsart NOSPE erfordert keine Teilnetzbildung, wodurch sich beträchtliche Kosteneinsparungen ergeben (z.B. weniger 380kV/220kV Einspeise-UWs).

Allerdings:

- Kosten einer Umstellung von RESPE auf NOSPE würden auch in einem deutlichen zweistelligen Millionenbereich liegen (in Abhängigkeit der vorhanden Schutztechnik)

Zusammenfassung und Empfehlungen

- Alle Kabelvarianten sind machbar.
- Kosten der Erdkabellösung vergleichbar mit Freileitungsvariante.
- Kabelkonstruktion und -anordnung sowie Verlegemethode sind zu optimieren.
- Bei der Verlegung sollte bevorzugt eine Pflugverlegung vorgesehen werden.
- Es werden Lösungen mit einem Kabelsystem und geschlossenem Ring vorgeschlagen, die spürbar zuverlässiger sind als die Freileitungsvariante.
- Das Konzept des gelöschten Netzes erzwingt hohe Zusatzkosten, insbesondere auch im Höchstspannungsnetz (siehe Projekte mit Auslösung „Bildung neuer 110kV Netzbezirke).
- Eine Umstellung auf NOSPE kann ohne Verschlechterung der Spannungsqualität erfolgen und birgt ein hohes Einsparpotential (insbesondere auch im Höchstspannungsnetz)
- Eine Kosten-Nutzen Analyse einer NOSPE Umstellung wird dringend empfohlen.
- Wegen des innovativen Charakters der Lösungsansätze könnte die Verkabelung auch als Pilotprojekt, ggfs. mit Fördermitteln, durchgeführt werden. Die IGLM bietet hierzu eine Innovationspartnerschaft an.

Vielen Dank

Prof. Dr. Heinrich Brakelmann
heinrich.brakelmann@uni-due.de
BCC Cable Consulting, Rheinberg
http://www.bcc-cableconsulting.com

Dr. Markus Pöller
markus.poeller@moellerpoeller.de
Moeller & Poeller Engineering GmbH (M.P.E.)
http://www.moellerpoeller.de