



Leibniz
Universität
Hannover

Vorstellung von Konzepten zur Optimierung der Trassenbreite von Kabelanlagen

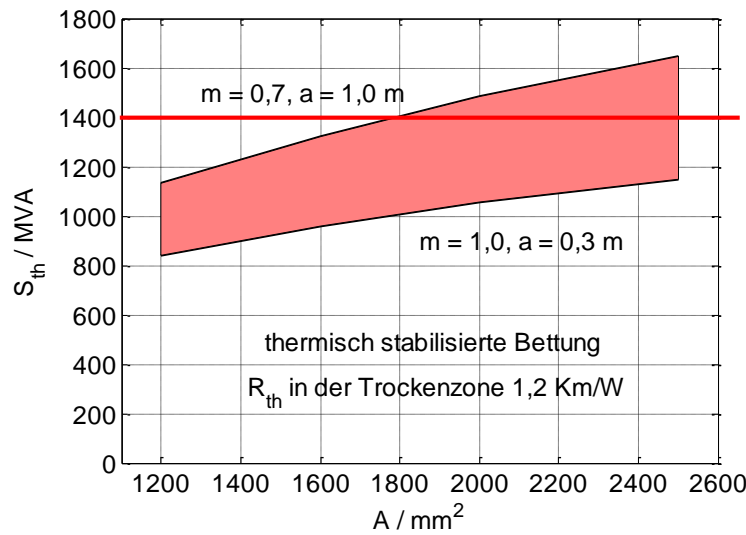
Lutz Hofmann



Institut für Elektrische Energiesysteme
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung
Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann

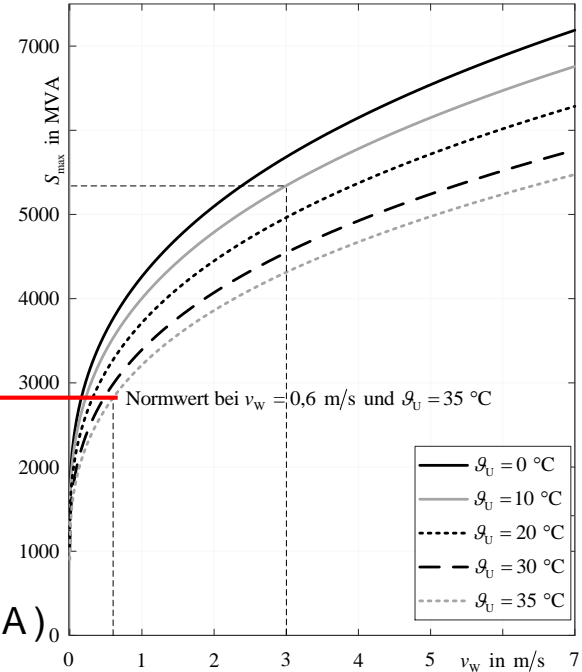
Hintergrund: Anforderungen an die Übertragungskapazität von Kabeln

- Übertragungskapazität von HöS-Kabeln ist kleiner als die von HöS-Freileitungen



380-kV-Kabel

≈ 1400 MVA

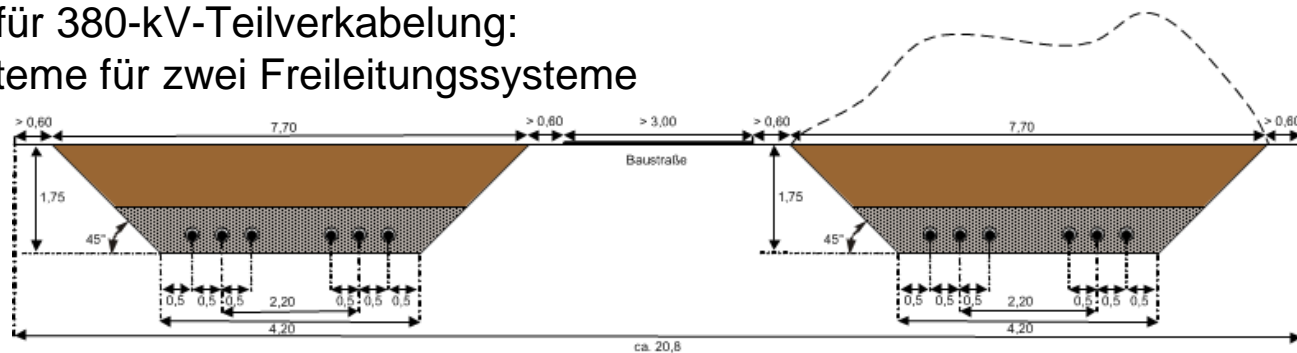


380-kV-Freileitung
 (4×562-AL1/49-ST1A)₀

≈ 2800 MVA

- Standardausführung für 380-kV-Teilverkabelung:
 zwei Kabeldoppelsysteme für zwei Freileitungssysteme

typisch 2500 mm²
 Kabelquerschnittsfläche



Hintergrund: Belastbarkeit von Kabeln

- die Belastbarkeit von Kabeln ist gegeben und begrenzt durch die thermische Belastung und Alterung des verwendeten Isolierstoffs (i.d.R. VPE)
- für Planung und Auslegung von Kabelanlagen relevant (u.a.):
 - Belastbarkeit im Dauerbetrieb
 - Kurzzeitbelastbarkeit
 } => **max. zul. Temperatur im Dauerbetrieb (bei VPE-Kabeln 90° C)**
- die sich einstellende Leitertemperatur ist entscheidend für die Lebensdauer einer Isolierung (nicht die maximal auftretende Stromstärke)
- Leitertemperatur größer als maximale zulässige Leitertemperatur
 - ➔ beschleunigte Alterung
 - ➔ Minderung der Lebensdauer
- Verluste im Kabel sind Wärmequellen
 - Stromwärmeverluste im Leiter
 - dielektrische Verluste im Isolierstoff
 - Stromwärmeverluste im Schirm, Mantel, etc.
 - ➔ **Abtransport der Wärme an die Umgebung**

$$g_{\text{Diel}} \leq g_{\text{max.zul.}}$$



Bild: Nexans

Hintergrund: Einflussfaktoren auf die Strombelastbarkeit von Kabeln

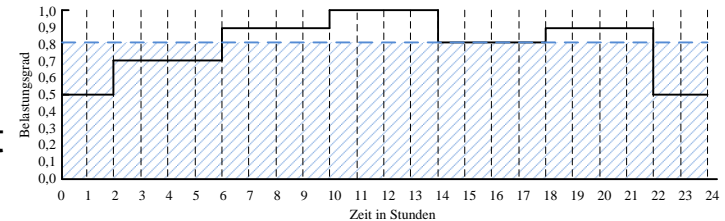
- Kabel-Bauart und Art der Legung
 - Kabel-Bauart (Anzahl Kabeladern, Querschnitte, Materialien, Aufbauschichten, etc.)
 - Legegeometrie (Anordnung im Dreieck, Flachlegung), Legetiefe, Abstände zwischen den Leitern und den Systemen, Anzahl Kabelsysteme
 - Legung in Erde, in Luft oder im Schutzrohr (in Erde)

- Betriebsart (Lastverlauf über der Zeit) =>
 - Tagesbelastungsgrad m :
 Quotient aus Durchschnittslast und Maximallast
 - z. B.: $m=0,7$: „EVU-Last“, $m=1,0$: Dauerlast

- Umgebungs- und Kühlungsbedingungen
 - Erdbodentemperatur
 - Umgebungstemperatur
 - Bodenparameter (spez. therm. Erdbodenwiderstand, Bodenfeuchtigkeit, etc.) oder bei Legung in Luft (Belüftung, Schutz vor Sonneneinstrahlung, etc.)
 - Kühlungsart (natürliche Kühlung oder Zwangskühlung)

- Erdung (beid-/einseitige Erdung Kabelschirme /-mäntel, cross-bonding)

- Fremdwärmequellen (z. B. Kreuzungen mit anderen Kabeltrassen)



Maßnahmen zur Minimierung der Trassenbreite

- optimierte Wärmeabführung durch Aufwertung der thermischen Eigenschaften des Erdbodens (durch thermische Stabilisierung)
- Vermeidung von hot-spots
- Vermeidung von Fremdwärmequellen
- Vergrößerung des Kabelquerschnitts
- deutlich höhere Strombelastbarkeit für einen begrenzten Zeitraum (h bis d) durch Ausnutzung der thermischen Reserven des Kabels (Kabelmonitoring)
- Zwangskühlung
- ggf. Zusatzkühlung auch nur bei Eintritt des (n-1)-Falls (abhängig von Übertragungsaufgabe)

- unterstützend: Abregelung von Einspeisespitzen

**„erste Indikation“
 bzgl. Auswirkungen***



→ kleinere Leiterabstände und Systemabstände

→ kleinere Leiterabstände und Systemabstände

→ Verzicht auf Kabel-doppelsysteme

*abhängig von der Übertragungsaufgabe

Erhöhung der Strombelastbarkeit durch thermische Stabilisierung


- Aufwertung der thermischen Eigenschaften des Erdbodens durch Einbringen eines definierten Rückfüllmaterial (thermisch stabilisiertes Bettungsmaterial)
- spez. thermische Wärmewiderstände ρ_{th} der Böden 1,0 bis 2,5 K·m/W
- spezielle Sand-Kies- (korngestufte Sande, ungleiche Korngrößen) oder Sand-Zement-Gemische (Magerbeton):
 - ρ_{th} selbst im ausgetrockneten Zustand < 1 K·m/W
 - ρ_{th} umso kleiner, je dichter und nasser der Boden gelagert ist
- Flüssigboden: $\rho_{th} < 0,7$ K·m/W (z. B. 380-kV-Leitung Raesfeld, Amprion)
- Wärmeleitbeton (Powercrete):
 ρ_{th} im Bereich 0,2 K·m/W (wassergesättigt) bis 0,3 K·m/W (trocken)
 - ➔ Verbesserung der Wärmeabführung
 - ➔ bei gleicher Übertragungsleistung geringere Kabel- und Systemabstände
- wird heute in neuen HöS-Kabelanlagen eingesetzt
- i.d.R. kein Verzicht auf Kabeldoppelsysteme (abh. von Übertragungsaufgabe)

Vergrößerung des Kabelquerschnitts von 380-kV-Kabel

- bisheriger Standard: 380-kV-Kabel mit 2500 mm² Kupferleiterquerschnitt
- aktuell verfügbare Kupferleiterquerschnitte max. 3000 mm²
- zukünftig weitere Querschnittssteigerungen z. B. 3500 mm²?

Continuous current ratings (Amperes)

Nominal section area mm ²	Laying conditions : Trefoil formation				Laying conditions : Flat formation				Nominal section area mm ²		
	Earthing conditions induced current in the metallic screen ρ_T en K.m/W	Direct burial		In air, in gallery		Earthing conditions induced current in the metallic screen ρ_T en K.m/W	Direct burial			In air, in gallery	
		$\rho_T = 1,0$ T = 20°C	$\rho_T = 1,2$ T = 30°C	T = 30°C	T = 50°C		$\rho_T = 1,0$ T = 20°C	$\rho_T = 1,2$ T = 30°C			T = 30°C
500 R		735	630	960	765		785	680	1 065	850	500 R
630 R		825	705	1 100	875		890	765	1 235	990	630 R
800 R		910	780	1 250	990		995	855	1 420	1 135	800 R
1000 R		985	840	1 385	1 100		1 095	935	1 605	1 285	1000 R
1000 S	Without circulating current	1 050	895	1 490	1 180		1 160	990	1 715	1 370	1000 S
1200 S		1 115	950	1 600	1 270		1 245	1 060	1 860	1 485	1200 S
1600 S		1 170	995	1 720	1 360		1 320	1 125	2 015	1 610	1600 S
1600 S En		1 255	1 065	1 855	1 470		1 430	1 220	2 195	1 755	1600 S En
2000 S		1 245	1 055	1 890	1 495		1 430	1 215	2 255	1 800	2000 S
2000 S En		1 360	1 150	2 090	1 650		1 590	1 355	2 540	2 025	2000 S En
2500 S En		1 470	1 245	2 325	1 835		1 765	1 495	2 880	2 295	2500 S En
3000 S En		1 510	1 275	2 425	1 915		1 825	1 545	3 025	2 410	3000 S En

≈1160 MVA

 ≈1200 MVA

Quelle: Nexans, 60-500 kV High Voltage Underground Power Cables, XLPE insulated cables, 2013

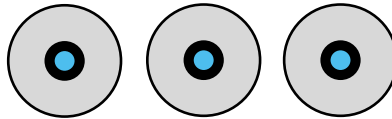
Erhöhung der Strombelastbarkeit von Kabeln durch Kühlung

– Legung im Kabeltunnel

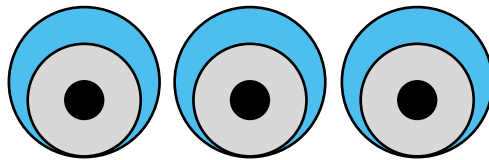
- natürliche Luftkühlung
- Zwangsluftkühlung

– Legung direkt im Erdboden (im Kabelgraben)

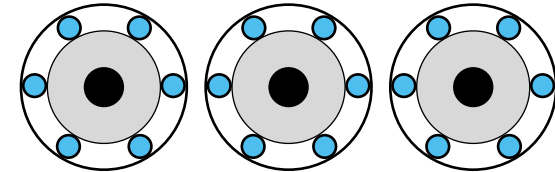
- Zwangskühlung mit Hilfe eines flüssigen Kühlmediums (Wasser, Öl)
 - Leiterkühlung (innere Kühlung)



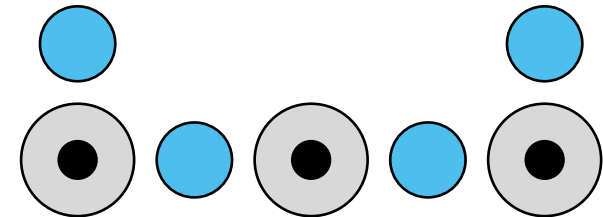
- Oberflächenkühlung (direkte Kühlung)



- Bündelkühlung



- laterale Kühlung (indirekte Kühlung)



- ein Kühlaggregat je Kabelsystem und ein weiteres Kühlaggregat (Redundanz)
- Kühlabschnittslängen von einigen km möglich

– zusätzlicher Energiebedarf (=Verluste) für Zwangskühlung und Pumpen

Kabelanlage im Tunnel mit Zwangsluftkühlung

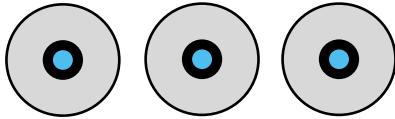
- Kühlung abhängig von Strömungsgeschwindigkeit und Eintrittstemperatur der Luft
- Bsp.: 380-kV-VPE-Kabelanlage in Madrid
- zwei parallele 380-kV-VPE-Cu-Kabel in Tunnelbauweise als Ersatz für Freileitung am Rande des Madrider Flughafens
- Länge 12,8 km
- Querschnittsfläche 2500 mm²
- 2×1390 MVA (Sommer),
2×1720 MVA (Winter)
- Leitungsgang begehbar
- Zusatzkühlung über 4 Stationen
und Entlüftung über 3 Stationen
- weitere Beispiele:
380-kV-VPE-Kabelanlagen
in Berlin und London



380-kV-VPE-Kabelanlage in Madrid,
 Quelle: Amprion

Leiterkühlung (innere Kühlung)

- höchste Wirksamkeit (Kühlung am Ort der Wärmequelle)



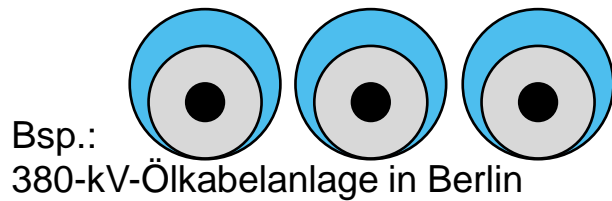
bislang Anwendung auf kurze Kabelstrecken,
 110-kV-Kabelanlagen

- Vorteile
 - Steigerung der Übertragungsleistung um ein Mehrfaches
- Nachteile
 - ständige Kontrolle und Aufbereitung des Kühlwassers
 - Aufwand für Kühlstationen
 - Anzahl und Positionen der Kühlstationen hängen von Strömungsgeschwindigkeit, Druckabfall und Temperaturdifferenz ab
 - besondere Endverschlüsse an den Kabelenden zum Abbau des Potentials des Kühlmediums auf Erdpotential (zur Rückkühlung)

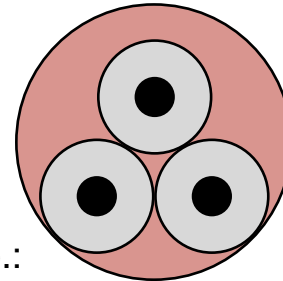
Quelle: Nexans, Höchstspannungskabel zur Energieübertragung, Garnituren, Installation und Engineering, 2006

Oberflächenkühlung (direkte Kühlung)

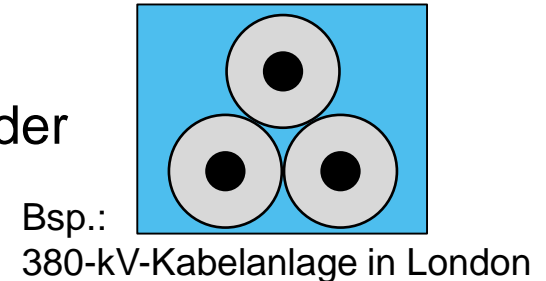
- Verlustwärme muss über den Wärmewiderstand des Kabels abgeführt werden
- Kabelschutzrohre als Kühlrohre ausgelegt (Durchmesser Schutzrohr ca. 300 mm)



oder



oder



– Vorteile

- Steigerung der Übertragungsleistung um das 2-3-fache
- geringere Anforderungen an die Kontrolle und Aufbereitung des Kühlwassers

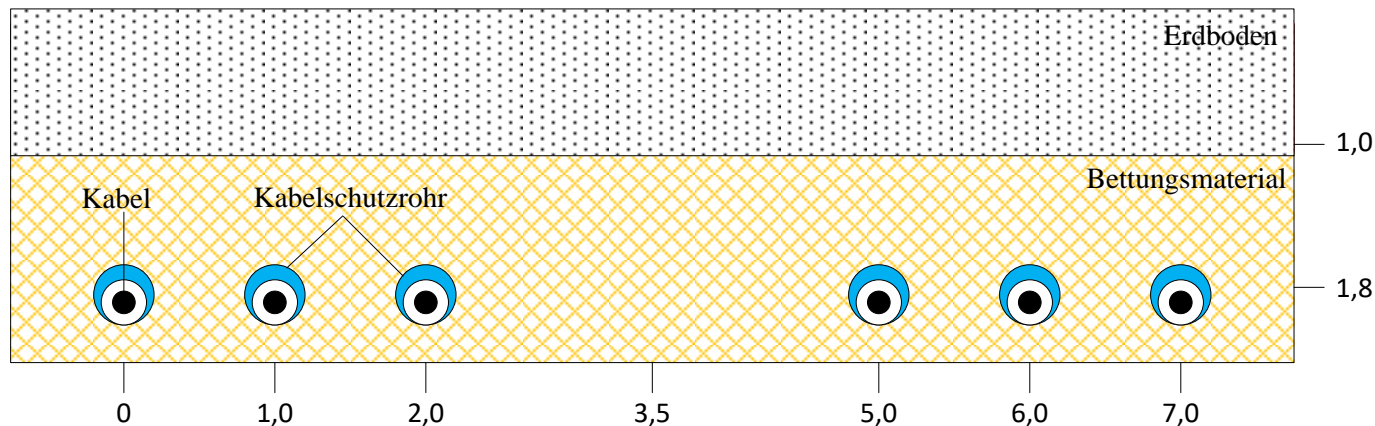
– Nachteile

- zahlreiche Kühlstationen, Anzahl und Positionen der Kühlstationen hängen von Strömungsgeschwindigkeit, Druckabfall und Temperaturdifferenz ab
- Durchführung des Cross-Bonding (Verschaltung der Kabelschirme) schwierig
- besondere Maßnahmen zur Kühlung der Endverschlüsse an den Kabelenden
- thermodynamische Bewegungen der Kabel mit den Kühlrohren bei Lastwechsel

Quelle: Nexans, Höchstspannungskabel zur Energieübertragung, Garnituren, Installation und Engineering, 2006

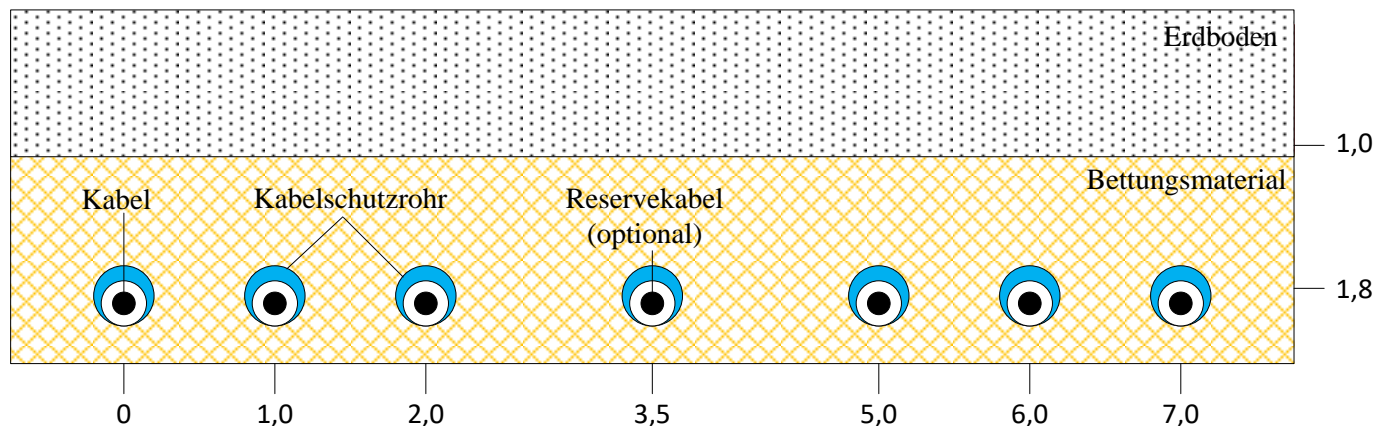
Minimaltrassen mit direkter Kühlung der Kabel

- Reduzierung der Anzahl der Kabelsysteme ist in Abhängigkeit von der Übertragungsaufgabe mit Zusatzkühlung ggf. möglich → Magnetfelder ↑
- kleinere Leiterabstände und Systemabstände sind ebenfalls möglich
- in Abh. von Übertragungsaufgabe kann Kabelanlage so ausgelegt werden, dass Zusatzkühlung nur im Fehlerfall notwendig ist (störungsorientierte Zusatzkühlung)



Minimaltrassen mit direkter Kühlung der Kabel

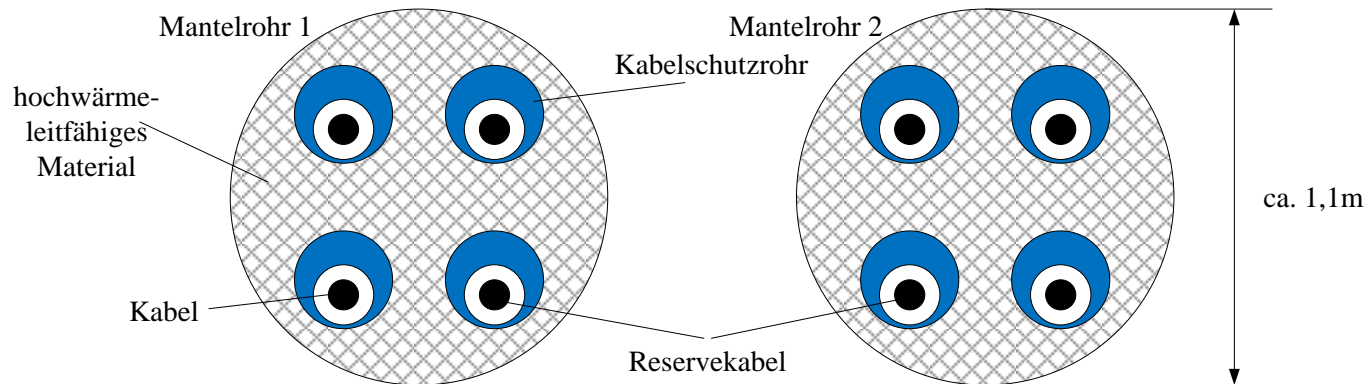
- Reduzierung der Anzahl der Kabelsysteme ist in Abhängigkeit von der Übertragungsaufgabe mit Zusatzkühlung möglich → Magnetfelder ↑
- kleinere Leiterabstände und Systemabstände sind ebenfalls möglich
- in Abh. von Übertragungsaufgabe kann Kabelanlage so ausgelegt werden, dass Zusatzkühlung nur im Fehlerfall notwendig ist (störungsorientierte Zusatzkühlung)
- zur Erhöhung der Verfügbarkeit (Redundanz) kann ein Reservekabel für beide Kabelsysteme ergänzt werden
 → Trassenbreite ↑, Überwachung Betriebsbereitschaft, Kosten ↑, Umschaltung



Quelle: Brakelmann, H., Jarass, L. J.: Erdkabel für den Netzausbau - Höchstspannungskabel, Drehstrom und Gleichstrom, Minimaltrassen, Zuverlässigkeit, Kosten. BoD - Books on Demand, 2019

Minimaltrassen mit direkter Kühlung der Kabel mit Mantelrohren

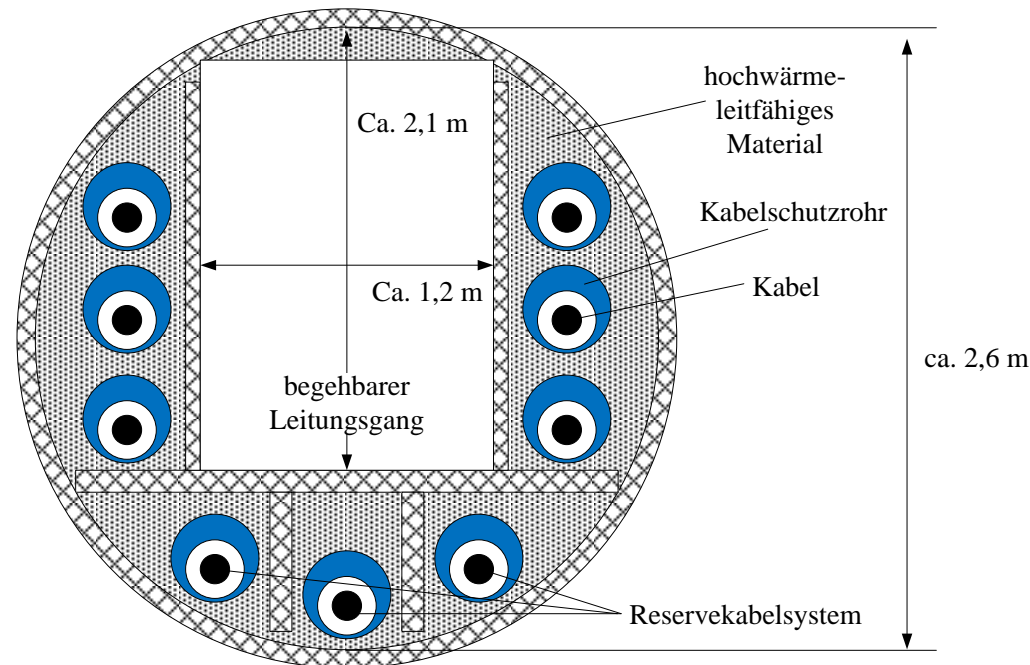
- Kabel sind direkt über Kabelschutzrohr zusatzgekühlt
- Zwischenraum im Mantelrohr mit hochwärmeleitfähigem Material gefüllt
- Reduzierung der Anzahl der Kabelsysteme ist in Abhängigkeit von der Übertragungsaufgabe mit Zusatzkühlung möglich
- kleinere Leiterabstände und Systemabstände sind ebenfalls möglich
- Verlegung durch Bohrverfahren möglich
- zur Erhöhung der Verfügbarkeit kann ein Reservekabel in jedem Mantelrohr ergänzt werden
- Überwachung Betriebsbereitschaft, Kosten \uparrow , Umschaltung



Quelle: Brakelmann, H., Jarass, L. J.: Erdkabel für den Netzausbau - Höchstspannungskabel, Drehstrom und Gleichstrom, Minimaltrassen, Zuverlässigkeit, Kosten. BoD - Books on Demand, 2019

Minimaltrassen mit Kabelanlage mit direkter Kühlung im Kabeltunnel

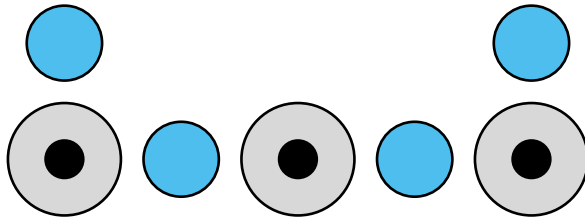
- zwei Kabelsysteme im Kabeltunnel
- Zusatzkühlung über direkte Kühlung im Kabelschutzrohr
- Zwischenräume mit hochwärmeleitfähigem Material
- Belüftung des Leitungsgangs
- Reduzierung der Anzahl der Kabelsysteme ist in Abhängigkeit von der Übertragungsaufgabe mit Zusatzkühlung möglich
- kleinere Leiter- und Systemabstände sind ebenfalls möglich
- Leitungsgang begehbar
- Verlegung durch Bohrverfahren möglich
- zur Erhöhung der Verfügbarkeit kann ein Reservekabelsystem ergänzt werden
 → Überwachung Betriebsbereitschaft, Kosten ↑, Umschaltung



Quelle: Brakelmann, H., Jarass, L. J.: Erdkabel für den Netzausbau - Höchstspannungskabel, Drehstrom und Gleichstrom, Minimaltrassen, Zuverlässigkeit, Kosten. BoD - Books on Demand, 2019

laterale Kühlung (indirekte Kühlung)

- Verlustwärme muss über den Wärmewiderstand des Kabels und dem des Erdbodens abgeführt werden



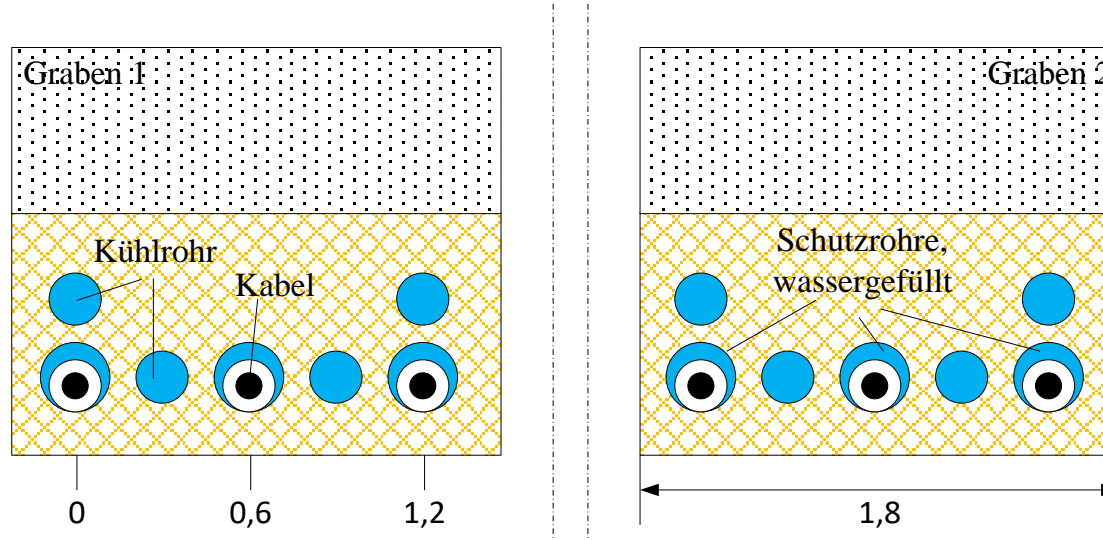
Bsp.: 380-kV-Ölkabelanlage in Wien und
 380-kV-VPE-Kabelanlage in Tokyo

- Vorteile
 - Steigerung der Übertragungsleistung um das ca. 1,5- bis 2,2-fache
 - Verwendung von herkömmlichen Kabeln und Endverschlüssen
 - geringere Anforderungen an die Kontrolle und Aufbereitung des Kühlwassers
- Nachteile
 - zahlreiche Kühlstationen
 - Anzahl und Positionen der Kühlstationen hängen von Strömungsgeschwindigkeit, Druckabfall und Temperaturdifferenz ab
 - besonderes Bettungsmaterial erforderlich

Quelle: Nexans, Höchstspannungskabel zur Energieübertragung, Garnituren, Installation und Engineering, 2006

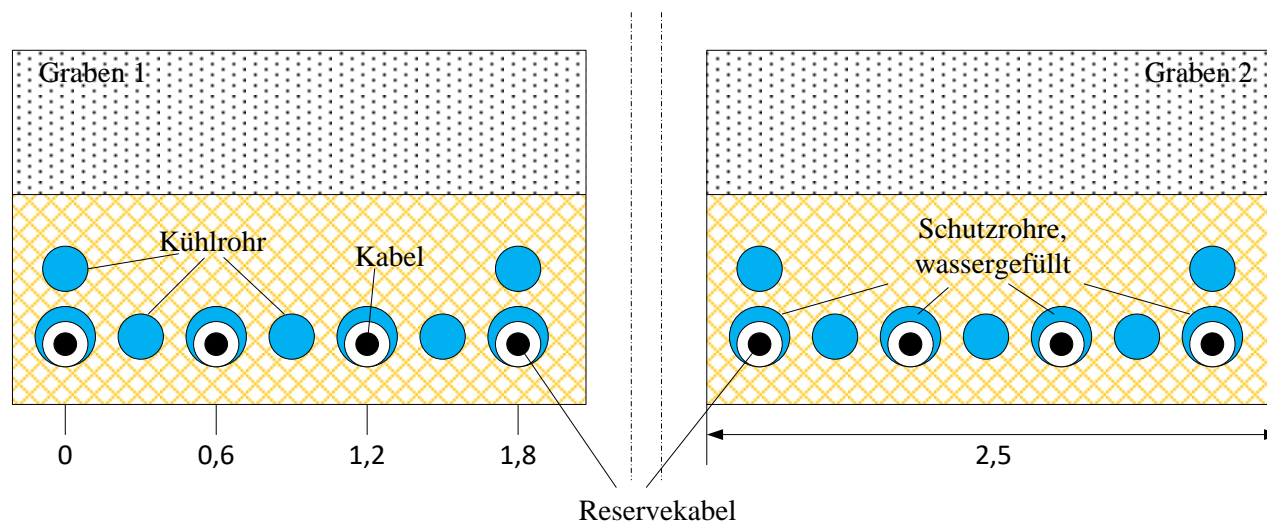
Minimaltrassen mit indirekter Kühlung der Kabel

- separate Kühlrohre um die Kabel angeordnet, Kabelschutzrohre wassergefüllt
- Reduzierung der Anzahl der Kabelsysteme ist in Abhängigkeit von der Übertragungsaufgabe mit Zusatzkühlung möglich → Magnetfelder ↑
- kleinere Leiterabstände und Systemabstände sind ebenfalls möglich



Minimaltrassen mit indirekter Kühlung der Kabel

- separate Kühlrohre um die Kabel angeordnet, Kabelschutzrohre wassergefüllt
- Reduzierung der Anzahl der Kabelsysteme ist in Abhängigkeit von der Übertragungsaufgabe mit Zusatzkühlung möglich → Magnetfelder ↑
- kleinere Leiterabstände und Systemabstände sind ebenfalls möglich
- zur Erhöhung der Verfügbarkeit kann ein Reservekabel für jedes der beiden Kabelsysteme ergänzt werden
 → Trassenbreite ↑, Überwachung Betriebsbereitschaft, Kosten ↑, Umschaltung



Quelle: Brakelmann, H., Jarass, L. J.: Erdkabel für den Netzausbau - Höchstspannungskabel, Drehstrom und Gleichstrom, Minimaltrassen, Zuverlässigkeit, Kosten. BoD - Books on Demand, 2019



Leibniz
Universität
Hannover

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann

hofmann@iee.uni-hannover.de



Institut für Elektrische Energiesysteme
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung
Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann