

Optimierte Betriebsmittelausnutzung für Energiekabel

Forschungsgemeinschaft
für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.

Dr. Gregor Brammer

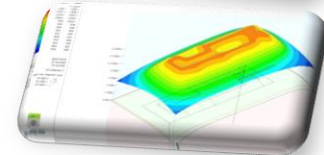
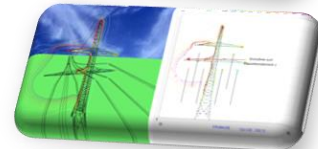
Gelsenkirchen, 21.06.23



Forschungsbereich Energietechnische Anlagen

Das Betriebsmittel im Fokus

- **Schadensanalyse / Ursachenklärung**
 - Schichtweises Zerlegen
 - Netzanalysen zur Ursachenermittlung
- **Elektromagnetische Beeinflussung**
 - Beeinflussungsfragen im Bereich von Freileitungen (BImSchV, DGUV)
 - Konzeptionierung / Optimierung von Erdungsanlagen
- **Kabelprüfung vor Ort**
 - 6/10kV – 18/30kV Inbetriebnahme
 - Messung von Teilentladungen und Tangens-Delta
- **Qualitätssicherung in der Produktion**
 - Entwicklung neuer (Inline-) Verfahren
 - Prototypenbau
- **Thermische Kabelauslegung**
 - Transiente Berechnungen nach IEC 60287/60853
 - Beliebige Verlegeformation
 - Bis zu 20% höhere Belastbarkeit bei Berücksichtigung von Lastgängen



Energiekabel

Aufbau von Energiekabeln

■ Von Innen nach Außen

- Leiter (verschiedene Formen)
- Isoliersystem (ISL, ISO, OSL)
- Bettungsmaterial
- Drahtschirm + Querleitwendel
- Bettungs- / Quellmaterialien
- Metallmantel
- PE-Mantel
- Armierungen

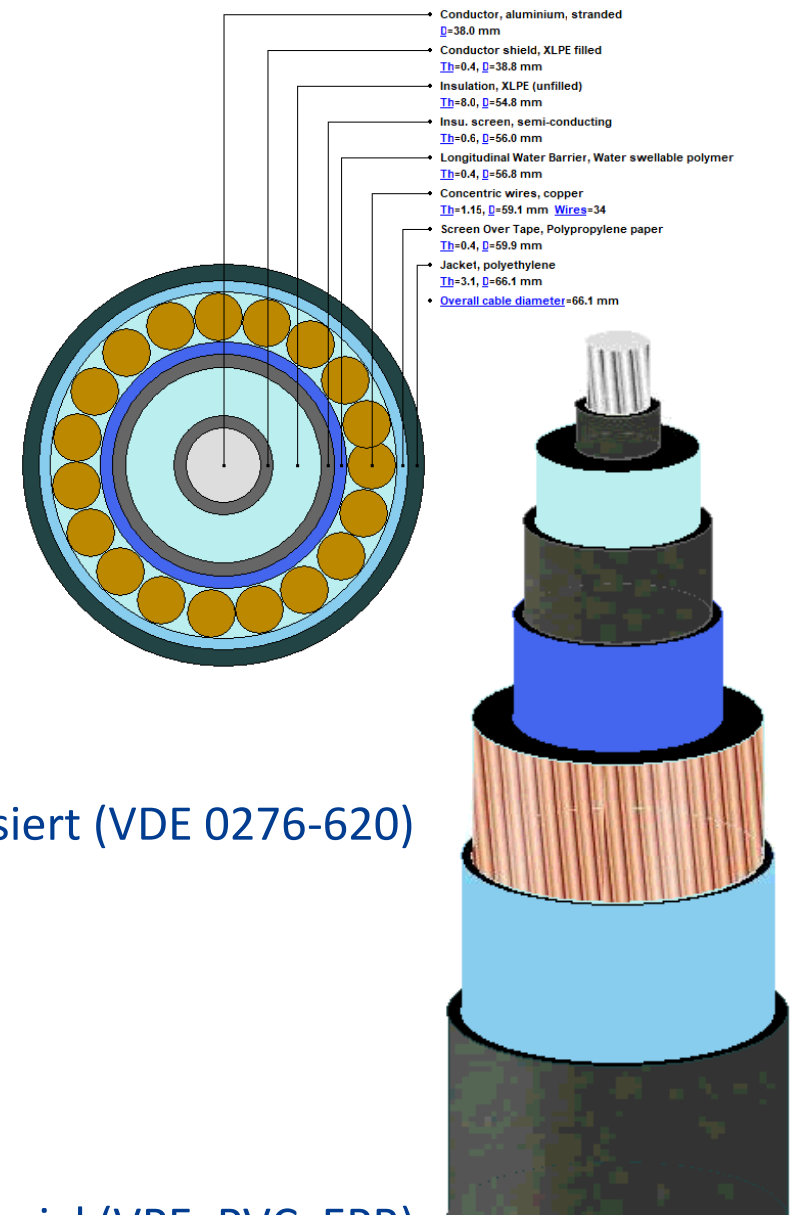
■ Abmessungen bei Mittelspannung standardisiert (VDE 0276-620)

■ Ursache für Wärmeerzeugung:

- Leiterverluste
- Dielektrische Verluste
- Schirmverluste

■ Maßgeblich für Grenztemperatur: Isoliermaterial (VPE, PVC, EPR)

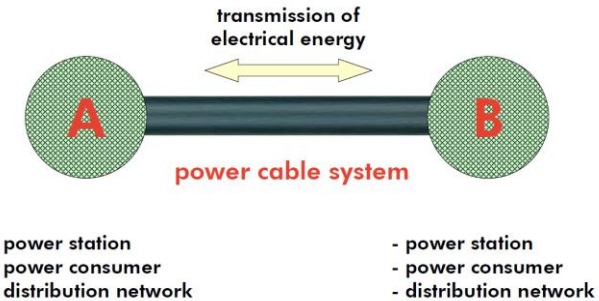
- → 70...90°C für neuwertige Kabel



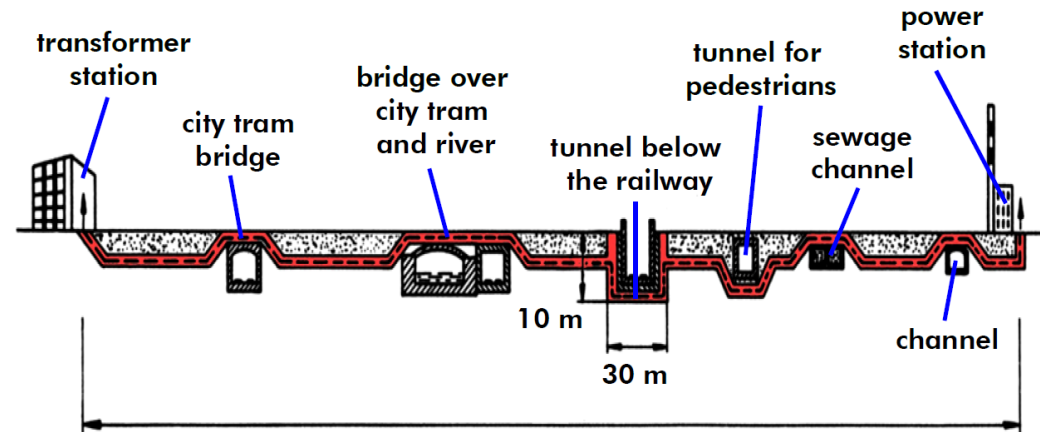
Energiekabel

Übertragung von Energie

- Kabel übertragen Energie von einem Ort zum anderen
- Zu übertragende Leistung abhängig von Projektspezifikation
- Trassenführung ist wichtiger Aspekt in der Planung



- Systemlänge
- Trassenbreite
- Verlegeformation
- Verlegetiefen
- Externe Wärmequellen
- Muffenplanung



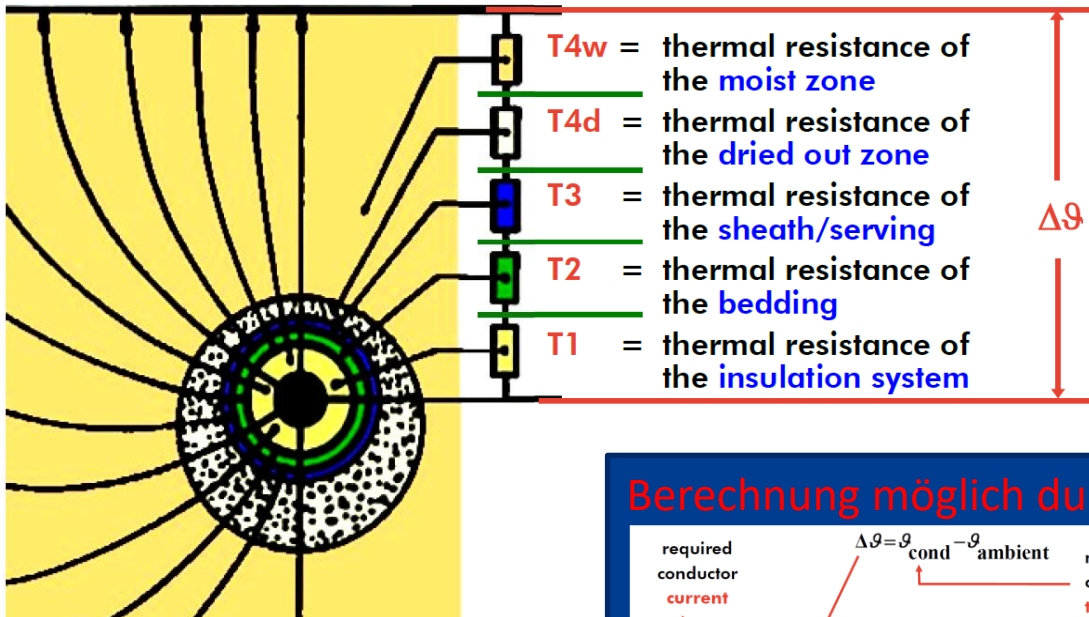
Planungen für späteres Assetmanagement

- Maximale prüfbare Länge von Kabeln
- Zugängige Prüfanschlüsse

Energiekabel

Thermo-Haushalt des Kabels

- Kabelaufbau
- Erdschichten
- Unterschiedliche Schichten besitzen unterschiedliche thermische Kennwerte
- Äußere Umgebungsbedingungen



Berechnung möglich durch Analogie zur Elektrotechnik

required conductor current $\Delta\vartheta = \vartheta_{\text{cond}} - \vartheta_{\text{ambient}}$ maximum conductor temperature

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\vartheta - W_d \cdot [0,5 \cdot T_1 + n \cdot (T_2 + T_3 + T_4)]}{R_{AC} \cdot T_1 + n \cdot R_{AC} \cdot (1 + \lambda_1) \cdot T_2 + n \cdot R_{AC} \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_4)}}$$

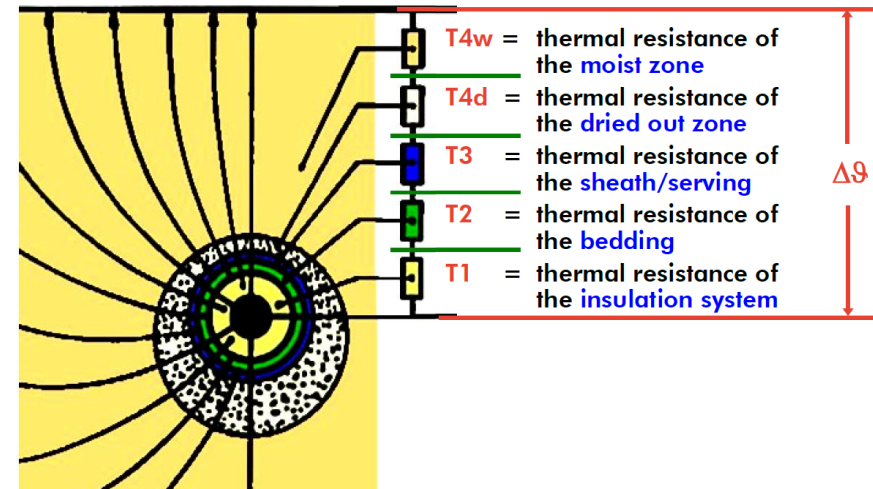
AC conductor resistance (cross-sectional area)

electrical: $U = R \cdot I$
 analog: $\Delta\vartheta = T \cdot W$

Energiekabel

Thermo-Haushalt des Kabels

- Hört sich einfach an, ABER:
 - Umgebungstemperatur ist nicht konstant
 - Thermischer Widerstand hängt ab von
 - Verlegetiefe
 - Rückfüllmaterial
 - Klimatischen Bedingungen
 - Zyklische Kabelauslastung
 - Teilweise Austrocknung von Böden
 - Kabelgruppierungen/Parallelverlegung
 - ...



Energiekabel-Auslegung

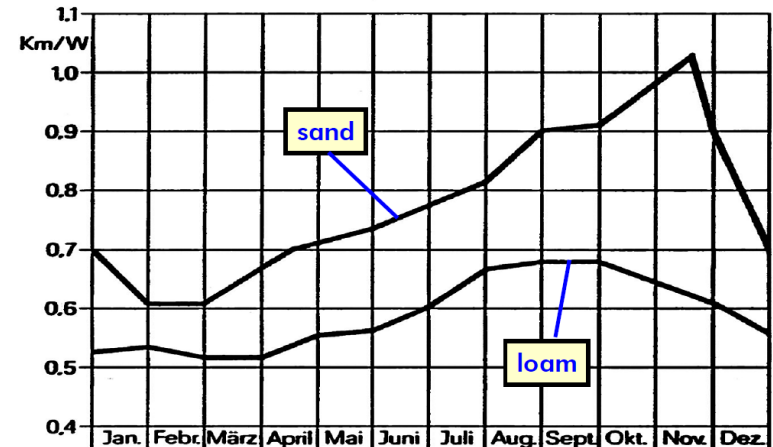
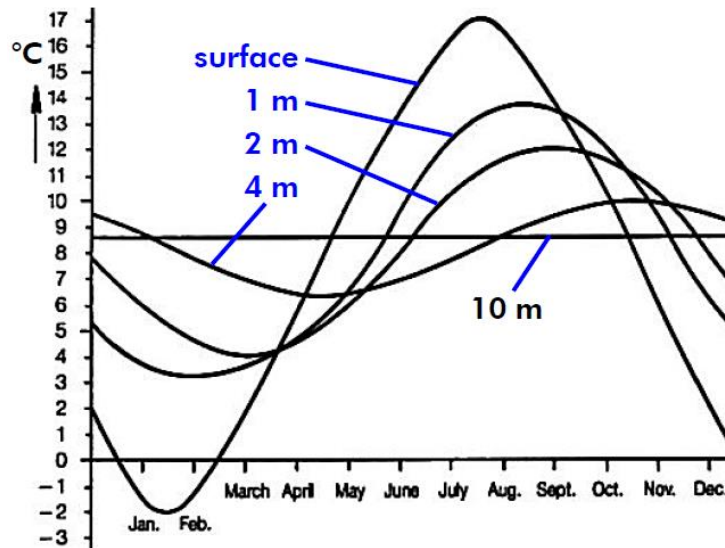
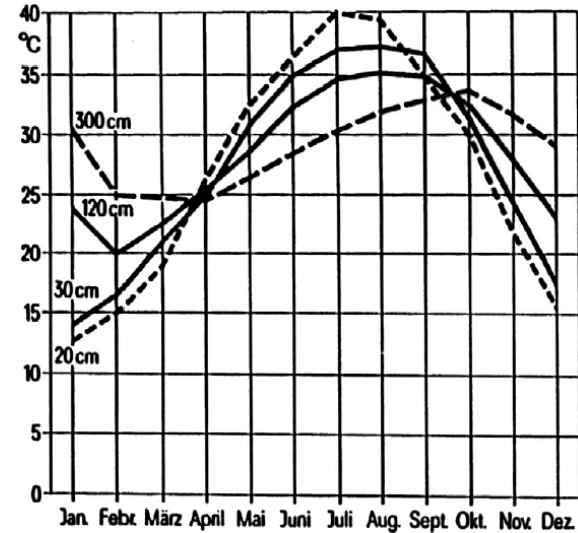
Beispiele für Abhängigkeiten der Parameter

■ Erdbodentemperatur

- Tiefenabhängigkeit
- Zeitabhängigkeit
- Standortabhängigkeit

■ Wärmewiderstand des Erdbodens

- Materialabhängigkeit
- Zeitabhängigkeit



Energiekabel-Auslegung

Auslegung nach VDE Tabellen 0276-620/298

- In Mittelspannung ist grundlegendes Kabeldesign standardisiert
 - Strombelastbarkeiten normativ vorgegeben
 - Mindestanforderungen
 - ABER: nur bis 500mm² Leiterquerschnitt
 - Belastbarkeiten für **größere Leiterquerschnitte** sind **nur durch Herstellertabellen** angegeben, und nur für **bestimmte Umgebungsbedingung**
 - Korrekturfaktoren für Abweichungen von der Normverlegung VDE 0276-298
 - „Norm-Strombelastbarkeit“ bei „Norm-Verlegung“
 - Multiplikative Erweiterung mit Korrekturfaktoren für jede einzelne Abweichung
 - **Insbesondere bei vielen Korrekturfaktoren nimmt Zuverlässigkeit des Ergebnisses ab!**
 - **Freie Modifikation der Verlegebedingungen nicht möglich**
- ➔ Berechnung nach IEC 60287

Energiekabel-Auslegung

Beispiele der Berechnungen nach IEC 60287/60853

- Häufung und Stapelung im Stadtbereich
- Herausforderung:
 - Geringe Trassenbreite / Trassenhöhe
 - Meist vollständige Trassenüberdeckung
 - Schutzrohrverlegung
 - Unterschiedliche Kabeltypen
 - Externe Wärmequellen (Fernwärme, Wasserleitungen, ...)
 - Darstellung der (n-1)-Sicherheit

➔ VDE-Tabellen sind nicht anwendbar

- Freie Parametervariation mit iterativer Berechnung
 - Variation Verlegetiefe
 - Abbildung der Systemausfälle
 - Verschiedene Verlegeformationen/Abstände

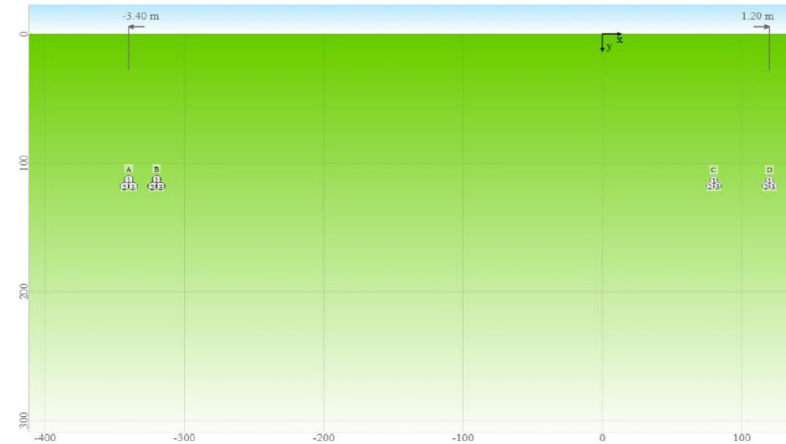


Energiekabel-Auslegung

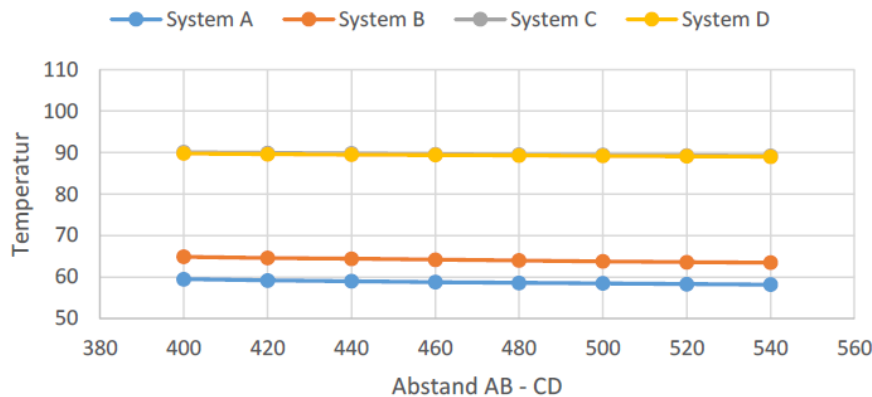
Beispiele der Berechnungen nach IEC 60287/60853: Windparks

- Parallelverlegung bei Bestandstrassen
 - Neubewertung nötig
 - Berücksichtigung der Urplanung
 - Bestand: Systeme C/D, Grenzauslastung
 - Neuplanung Systeme A/B
 - Abstandsvariation, bis Einfluss „minimiert“

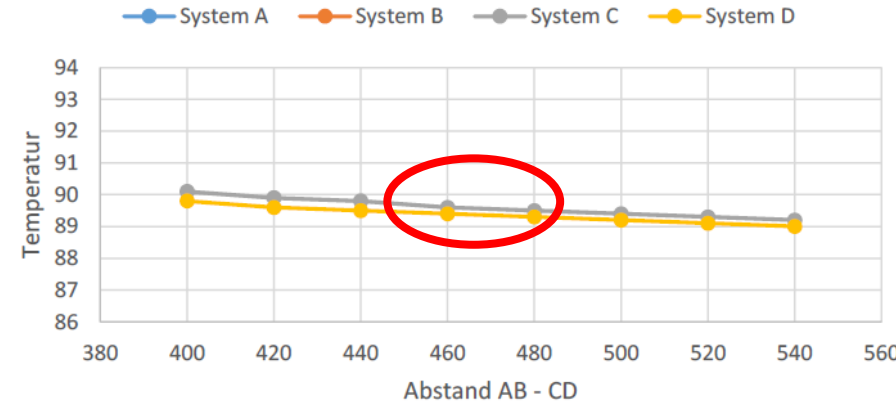
➔ Die resultierenden Abstände können die Trassenplanung empfindlich beeinflussen



800qmq - A307 B403 CD382



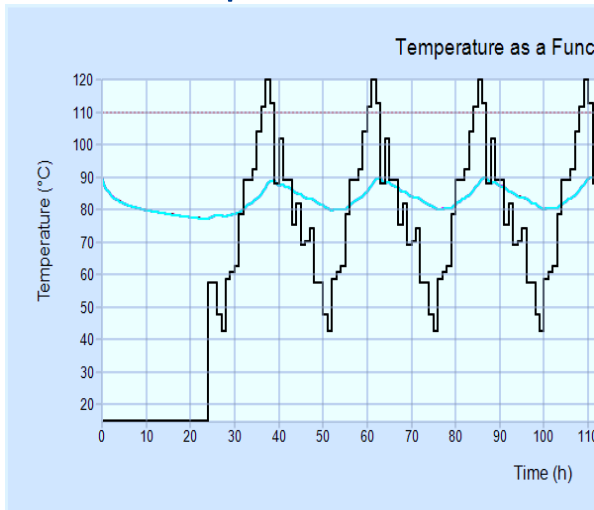
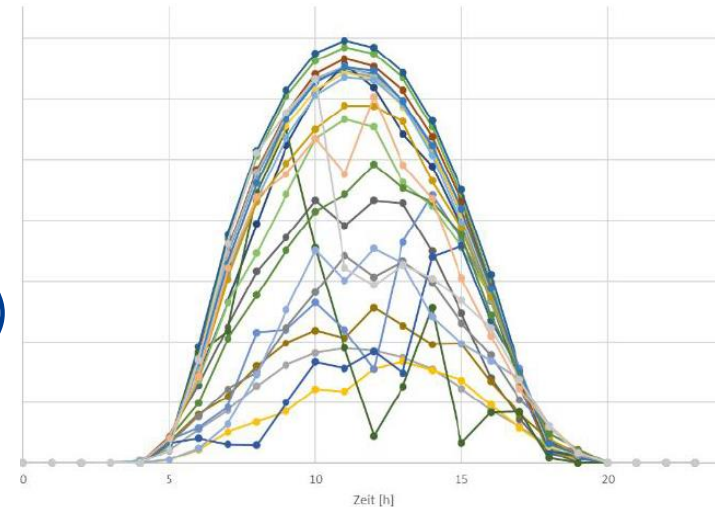
800qmq - A307 B403 CD382



Energiekabel-Auslegung

Beispiele der Berechnungen nach IEC 60287/60853: PV-Parks

- PV-Parks weisen typische Lastprofile auf
- Abkühlprozesse im Kabel und Erdboden
- Aufheizphasen bei Nennstrom teils >10h
- Lastprofile frei definierbar (Messdatenbasiert)
- ➔ Transiente Kabeltemperaturen
- ➔ Höhere zulässige Stromtragfähigkeit bis Grenztemperatur erreicht wird (bis zu +20%)



■ Thermisches Wechselspiel

- Leerlauf \leftrightarrow Vollast
- Erhöhte mechanische Belastung von Garnituren
- ➔ Umfängliche Inbetriebnahmeprüfung (Fingerprint)
- ➔ regelmäßige Prüfung auf Teilentladungen

Optimierte Betriebsmittelausnutzung für Energiekabel

Zusammenfassung

- Kabeldesign in Mittelspannung größtenteils standardisiert
- Trend zu größeren Querschnitten (nicht gänzlich durch Norm abgedeckt)
- Bodenparameter mit erheblichem Einfluss auf die Strombelastbarkeit
- Verlegeformationen und – Bedingungen meist schwer durch standardisierte Formen abdeckbar
- Korrekturfaktoren aus VDE-Tabellen in größerer Anzahl ungenau oder gänzlich unzulässig
- Klare Vorteile in der iterativen Berechnung nach IEC
 - Abbildung der Erdbodeneigenschaften
 - Genauere Ergebnisse
 - Freie Verlegeformation
 - Parametervariationen zur Optimierung
 - Ausnutzung von Lastprofilen zur Steigerung der zulässigen Strombelastbarkeit