**Freileitung**

**-Zusammenfassung-**

WS 2012/2013

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3

1.1 Netzstruktur in DEU 3

1.2 Nutzen von versch. Spannungsebenen 3

1.3 Netzbetreiber 3

1.4 Verbundbetrieb – europaweit 3

1.5 Regelenergie (Sekunden, Minuten, Stunden) 4

1.6 Verteilnetz vs. Übertragungsnetz 4

1.7 Kabel vs. Freileitung 4

1.8 Frequenz 4

1.9 Versorgungsqualität 4

1.10 Komponenten der el. Versorgung 4

1.11 Anforderungen an el. Energieversorgung 5

1.12 Anforderung durch volatile Einspeisung – WEA (Trends 2030+) 5

2 Grundlagen 5

2.1 Planung der Übertragung 5

2.2 Wahl der Übertragungsspannung 7

2.3 Wahl der Leiterbelegung 7

2.4 Wahl des Mastbildes 7

2.5 Übertragung mit Drehstrom oder Gleichstrom 7

2.6 Vergleich HVAC-HVDC 7

2.7 Baukosten 8

2.8 Trassensicherung und Genehmigung 8

2.9 Planungs- und Verfahrensablauf 8

3 Elektrische Anforderungen und Auslegung 10

3.1 Freileitung als elektrisches System 10

3.2 Auswirkungen von Strom und Spannungen auf Personen und Anlagen 10

3.3 Anforderungen an die Isolation 11

4 Schutz gegen Auswirkungen von Blitzeinschlägen 12

4.1 Blitzstromparameter 12

4.2 Wirkung der Blitzentladung 12

4.3 Blitzschutz 12

5 Erdung von Freileitungen 13

5.1 Anforderungen von Erdungsanlagen 13

5.2 Berührspannung 13

5.3 Auslegung von Erdern an HS-Masten 13

6 Leiter, Isolatoren und Armaturen 14

6.1 Leiter 14

6.2 Isolatoren 17

6.3 Armaturen 18

7 Leitungstechnische Berechnung 20

7.1 Mindestabstandshöhe/Durchhang 20

7.2 Zustandsgleichung 20

7.3 Strombelastbarkeit 20

8 Optimierung 20

8.1 Leistungserhöhung 20

8.2 Wellenwiderstand und natürliche Leistung 21

8.3 Hochtemperaturleiter (ACCC/ACCR) 21

8.4 Freileitungs-Monitoring 22

8.5 Verbinder-Prüfung 23

8.6 Grenzen der Strombelastbarkeit 23

8.7 Spannungsstabilität 23

8.8 Strombelastbarkeiten für Netzplanungsberechnungen 23

# Einleitung

## Netzstruktur in DEU

### Allgemeines (Deutschland)

* Schwachlast ~35GW
* **Peakleistung** ~85GW
* PV-Einspeisung ~30GW

### Erzeugung: 10-27 kV

### Transportnetz: 400kV/220kV Höchstspannung

* Transport in versch. Regionen
* **Vermaschte** Struktur(HS/HÖS):
  + Sicherste Variante eines Netzwerkes 🡪 **Zuverlässigkeit**
  + Durch Umleitung Energieaustausch gewährleistet
* Länge in DEU ca. **36000km**
* Transportnetze ca. **96% Freileitungen**

### Verteilnetz: < 110kV Hochspannung

* Transport **innerhalb** versch. Regionen
* HS: ca **75.000 km** Freileitung und Kabel
* MS (20 kV, 10kV) 490.000 km, vorwiegend Kabel
  + **Offene Ringnetze**
  + **Ca. 64% Kabel**

### Niederspannungsnetz: 230/400V

* < 1 Mio. Kabel
* **Strahlennetze**
* Städtische Gebiete 🡪 Ringnetze mit offenen Trennstellen
* Ca. **80% Kabel**

## Nutzen von versch. Spannungsebenen

* Ziel: Optimierung der Gesamtwirtschaftlichkeit
* Übertragungsverluste minimieren: **P=I\*R2** (HS)
* **Isolation minimieren** (NS), Maste, Instandhaltung etc...
* Zweck: Verteilung & Übertragung

## Netzbetreiber

* EnWG (1999) Stromerzeugung und Netzbetrieb organisatorisch getrennt
* Aufgaben:
  + **Instandhaltung** und ggf. **Ausbau** des Netzes/Infrastruktur
  + Messen von Stromeinspeisung und Stromentnahme – Kraftwerkeinsatzplanung
  + Einhalten von Grenzwerten für Spannung und Frequenz
  + **Abrechnung** von Nutzungs-/Anschlussgebühren

## Verbundbetrieb – europaweit

* UCTE (1951), Zusammenschluss zu ENTSO-E (2009) 🡪 Koordinierung der Erzeugung und des Transports elektrischen Energie
* Vorteile:
* **Unempfindlicher** gegen einzelne Ausfälle sowie plötzliche Lastspitzen
* Gemeinsame Nutzung von **Reserven**/Kapazitäten
* **Frequenzreglung**
* Preisentwicklung(Liberalisierung)
* DEU: Ca. 53 TWh Import & ca. 61 TWh Export

## Regelenergie (Sekunden, Minuten, Stunden)

* **Sekundenreserve**: Schwungmasse der Generatoren
* **Minutenreserve**: Gasturbinen, Wasserkraft
* **Stundenreserve**: Kohlekraftwerk
* Leistungsüberschüsse/-einbrüche ausgleichen

## Verteilnetz vs. Übertragungsnetz

* Übertragungsnetz:
  + Ländlicher Bereich für große Strecke
  + Wirtschaftlichkeit
* Verteilnetz:
  + Platzbedarf geringer für Freileitungsmasten

## Kabel vs. Freileitung

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Kosten/km** | Nutzungsdauer | Sicherheit | Breite | Öko. Aspekte |
| Kabel | **4-7 Mio. €** | 40 Jahre | Selten Störungen, aufwendige Reparaturen | 15 m | Entfernung Vegetation, Bebauung kaum möglich |
| Freileitung | **1 Mio. €** | 80 Jahre | Häufige Störungen, Reparaturen einfach | 70 m | Maststandortbegrenzung  Bewuchs unterhalb der Leitungen möglich |

## Frequenz

* Europaweit: 50 Hz Drehstromnetz der ENTSO-E – Betriebsmittel & Generator ausgelegt
* < **0,05 Hz abweichen** 🡨🡪 Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch
* > 0,05 Hz 🡪 Abschalten von Erzeugern oder Verbrauchern (sonst Blackout)

## Versorgungsqualität

* Servicequalität – Qualität der Geschäftsvorgänge
* Versorgungszuverlässigkeit – Anzahl und Dauer der Versorgungsunterbrechung
* Spannungsqualität – Europäischen und internationalen Normen
* Verantwortlich für Endverbraucher-Störungen:
  + MS: 80%
  + NS: 20%

## Komponenten der elektrische Versorgung

* Umspannanlage: - HS🡪MS Trafo, Schaltanlage, Sammelschiene, Schutz & Steuerungstechnik, Leistungsschalter, Trenner, Messgeräte
* Trafostation (MS) – MS🡪NS: Schaltanlagen, Trafos, Sicherungen

## Anforderungen an elektrische Energieversorgung

* Versorgungssicherheit und Energieeffizienz müssen über gesamte Prozesskette gewährleistet werden

## Anforderung durch volatile Einspeisung – WEA (Trends 2030+)

* Probleme:
  + **Erzeugungsüberhang** im Norden DEU (Wind)
    - Auslastung des vorhandenen Transportnetzes in Nord-Süd-Richtung
  + EEG und EnEG 🡪 Verpflichten zum Netzausbau
    - Netzengpässe begrenzen Stromhandel –NTC
* Anpassung der Übertragungskapazität
  + Horizontal 🡪 Leitungskapazitäten, Engpässe zu benachbarten ÜNB
  + Vertikal 🡪 Anpassung der Umspannstationskapazitäten
* Anpassung der Verteilungskapazitäten
* Dynamische Kraftwerksplanung
* Einspeisung ins Verteilnetz (Umkehrung des Lastflusses vor allem durch PV)

# Grundlagen

## Planung der Übertragung

### Ziele

* Definition und Spezifikation der Übertragungsfähigkeit anhand von Qualitäts- und Zuverlässigkeitskriterien zu min. Kosten
  + **Kontinuierlicher Planungsprozess**

### Planungsstadien

* **Langfristige Planung (15-30 Jahre)**
  + Zubau: **konventioneller Kraftwerke** & EE 🡪 neue Übertragungsleitungen
  + Neue Techniken 🡪 evtl. DC-Abzweige, neue Speichertechnologien (Power to Gas)
* **Mittelfristige Planung (10-15 Jahre)**
  + Grundlegende Anforderungen/Kennzeichen
    - Spannung, Übertragungswege, Umspannwerke etc.
* **Betrieb oder kurzfriste Planung (3 Jahre)**
  + Dringende Erfordernisse des Netzes 🡪 Kapazität
* Dynamische Anpassung oder Planung
  + Strategischer oder volkswirt. Wechsel (Energiemarkt)
  + Umstrukturierung oder Privatisierung

### Planungsmethoden

* **Datenerfassung und –aufbereitung**
  + Neue Kraftwerke oder Übertragungskapazitäten 🡪 Vorlaufzeiten für **Grundstückerwerb** (3-10 Jahre)
  + Entscheidung auf Basis langfristiger Lastflussprognosen 🡪 Erzeugungskap. sicherstellen
  + Marktprognose erforderlich
  + Planung der Erzeugungskapazitäten durch Versorgungsunternehmen in lang- und mittelfristigen Studien
* **Formulierung und Vorauswahl von Alternativen**
  + Alternativen für Expansion Übertragungssystem 🡪 Leistungsanhebung oder Verstärkung des Netzes
  + Szenarien in NEP 2012:

1. Klassische 2022: Energie- & Klimapolitische Ziele 🡪 Eingespeiste & installierte Energie (PV & WEA) 🡪 moderater Anstieg konv. Kraftwerke
2. Leitszenario 2032: Baut auf Szenario, berücksichtig schnelleren Anstieg EE, Brückentechnologien (Gaskraftwerke)
3. Basiert auf hohen Anteil EE 🡪 aus regionalen Entwicklungsprognose & Zielen der Bundesländer

* **Elektrische Studien**
  + **Lastfluss**, **Systemstabilität**, Spannungsebene, Leiterwahl, Koronaverhalten (Geräusche 🡪 Knistern Grenzwerte), Elektromagnetische Wirkung, Überspannung & Isolationsauslegung, Schutzrelais
* **Wirtschaftliche Studien und abschließende Beurteilung**
  + Beurteilung vorausgewählter Studien (elektrische Studien) hinsichtlich wirt. Kriterien
  + **Ermittlung der Kostenvorteile**: **Kapitalanlage, Instandhaltung, Verfügbarkeit d. Energie,** Leistungshandel
* Abschließende wirtschaftliche Machbarkeit und Sensitvitätsanalyse
* Wahl optimaler Alternative 🡪 Erfahrung entscheidend

### Planungsmaßstäbe

* **Allgemeines**
  + Grundlegendes Kriterium der Netzplanung 🡪 Kein Leistungsverlust (**n-1 Kriterium**), Unterscheidung **stabile und transiente Bedingungen**
* **Kriterien für stabile Bedingungen**
  + Beurteilung Hoch- und Niedriglaststandhaltung
  + Ermittlung der Lastflüsse 🡪 Auslastung der Betriebsmittel oder Sammelschienenspannung
* **Kriterien für vorübergehende und transiente Bedingungen**
  + **Stabiles System in jedem Lastzustand** bei Außenleiter-Erde Kurzschluss ohne Kurzunterbrechung(KU) gewährleisten
  + Temporäre Überspannungen 🡪 Keine Zerstörung der Ausrüstungsteile (140-150%)
  + Betrachten und Analyse von Überspannungszuständen: **Lastabwurf**, unsym. Fehler, Einschaltvorgang, Leitungsausfall, Schalthandlung

## Wahl der Übertragungsspannung

### Entwicklung

* Keine 15 kV Drehstrom mehr 🡪 I2R Verluste zu hoch
* 380 kV max. 🡪 **wirtschaftliche Übertragungsspg. wegen Abständen**

### Einsatz

* Mit Übertragungslänge nimmt Leistung zu 🡪 **380kV – bis ca. 400km**
* **500 kV DC Platzbedarf wie 380 kV AC**

## Wahl der Leiterbelegung

* Leiter 🡪 wesentliches Bauelement
  + Wirtschaftliche & sichere Übertragung sicherstellen
  + **25 – 50% der Baukosten**
  + Optimale Auslegung: Kompromiss zwischen mechanischen und elektrischen Eigenschaften
    - Äußere Umwelteinflüsse (Salzwasser Nordsee)
    - Spannungshöhe
    - Leiteraufbau und Leiterquerschnitt
  + Unterschiedliche Konstruktionen 🡪 Anforderung abhängig
    - Verbundleiter (Al(Außen)/St(Innen))
      * Stahl sehr zugfest, allerdings schlechte Leitfähigkeit
      * Aluminium gute Leitfähigkeit
    - Hohleiter (z.B. Gasleitungen)
    - Hochtemperaturfähigkeit 🡪 Ausgelastete Leitung
    - LWL Seile 🡪 Drähte in Röhrchenform, Datenübertragung möglich

## Wahl des Mastbildes

* **# Stromkreise**, Ausführung, Anordnung, Ästhetik & Anpassung ans Gelände
* MS 🡪 **Schutz vor Großvögeln** 🡪 Zusätzliche Kunststoffisolierungen
* Oft gegensätzliche Anforderungen 🡪 Geringe Masthöhe und geringe Trassenbreite
* Mastbilder Folie 26-28

## Übertragung mit Drehstrom oder Gleichstrom

* Vergleich von DC zu AC
* **mit höher UDC könnte mehr Leistung übertragen werden, da Platzbedarf geringer ist** (siehe Folie 31)

## Vergleich HVAC-HVDC

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Vorteile | Nachteile |
| AC | Einfache Netzintegration | Thermische & dielektrische Verluste |
| Freileitungs-Monitoring nutzbar | Blindleistungskompensation erforderlich  Auf-/Umladen der Kapazitäten/Induktivitäten |
| Geringe Anfälligkeit/Nichtverfügbarkeit |
| Langlebig (Freileitungen: 80-100 Jahre) |
| Betriebserfahrung |
| DC | Nur thermische Verluste | Keine Überlastfähigkeit |
| Entkopplung von Netzgebieten | Keine Multiterminallösungen (P2P) |
| Kurzlebige Leistungselektronik (20 Jahre) |
| u.U. als Kompensationseinrichtung einsetzbar |
| Geringe Betriebserfahrung |
| Kurze Wartungszyklen |
| Starker Einfluss von Fehlern |

## Baukosten

* Unterliegen erheblichen Schwankungen
  + Elektrische und mechanische Eigenschaften der Leiter und Masten
  + Verhältnis von **Trag- zu Abspannmasten** 🡪 Zugkraftabnahme mit Winkel evtl. ausstatten 🡪 aufwendig und teuer
  + Klimabedingungen (Eislast)
  + Entschädigungskosten 🡪 Grundeigentum, Ausgleichsmaßnahmen
* Anhaltswerte (Folie 35-36)
  + 380 kV Freileitung ≈ 800-1000 T€/km
  + 110 kV Freileitung ≈ 350 T€/km
* Kabel ab 10km unwirtschaftlich

## Trassensicherung und Genehmigung

* Konstruktionen durch **juristische Entscheidungen** eingeengt
* Vorgabe von Rahmenanforderungen an jeweiliges Landesgesetz
  + Landesplanungsgesetz
  + Naturschutzgesetz
  + Forstgesetz
  + Bauordnungen
* Planungsstufen
  + **Trassenvoruntersuchung** 🡪 **Raumordnungsverfahren (ROV**) 🡪 **Planfestellungsverfahren (PFV**)
* Ergebnis
  + Grobkorridor🡪 raumordnerisch abgestimmter Trassenkorridor 🡪 liniengenaue Trasse mit Maststandorten, Schutzstreifen

## Planungs- und Verfahrensablauf

### Großräumige Trassenvoruntersuchung

* Identifizieren möglicher Trassenkorridore und Vorauswahl
* Trassierungsgrundsätze:
  + Bei möglicher Bündelung mit: HS-Freileitungen, **Hauptverkehrsstraßen Bahnlinien**
* Vermeidung von:
  + **Annäherung an Siedlungsflächen, Querung von Waldbeständen**, Querung von wertvollen Gebieten für Natur und Landschaft

### Raumordnungsverfahren (ROV)

* Vergleichende Untersuchung der Raum- und Umweltverträglichkeit der eingebrachten Vorzugs- und Alternativkorridore
* Ziele & Aufgaben:
  + Prüfung und Bewertung durch Landesplanung
  + Vergleiche Alternativen (Raum- & Umweltverträglichkeit)
* Ergebnis:
  + Landesplanerische Beurteilung & ggf. Empfehlung
* Methoden:
  + Erfassung der Topologie mithilfe von **Laserscanning**
    - Terrestrische Laserscanning (Stativ vom Erdboden)
    - Airborn (mit Hubschrauber)

### Planfestellungsverfahren (PFV)

* Festlegung der Freileitungstrasse(maststandortgenau) innerhalb des raumordnerischen Trassenkorridors
* 4 Jahre für ROV und PFV

## Planungsergebnisse (zur weiteren Auslegung, Konstruktion, Errichtung)

* Leitungslängen
* Leistung im Normalfall/Notfallbetrieb
* Spannung, Leiter, Erdseil
* Anzahl an Stromkreisen
* Masttyp, Bündelleiter
* Höchste zulässige Verluste

# Elektrische Anforderungen und Auslegung

## Freileitung als elektrisches System

* R – Betriebswiderstand (Resistenz) 🡪 **Stromwärmeverluste**
* GA – Leitwert der Ableitstrecken 🡪 Koronaverluste/Leckströme (Isolation)
* Xb – Betriebsreaktanz 🡪 Schleifen - & Koppelinduktivität
* Cb – Betriebskapaztiät 🡪 Koppelkapazitäten

### Natürliche Leistung:

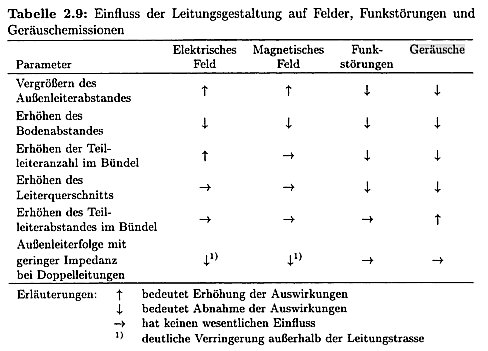
* Freileitung mit **Wellenwiderstand** (Zw) belasten 🡪 Übertragene Leistung = natürliche Leistung ()
* Übertragene Leistung ohne Blindleistungsverluste
* Auf-/Umladen von kap./ind. induzierten Strömen
* Leistung > Pnat 🡪 **Zuschalten paralleler Kondensatoren** 🡪 Reduktion des Spannungsfalls entlang der Leitung
* Leistung < Pnat 🡪 **Zuschalten von Drosseln**

### Möglichkeiten zur Erhöhung Pnat

* Übertragungsspannung (Ub) erhöhen 🡪 Trafostufensteller
* **Verminderung von Zw  (Cb↑ & Lb ↓)**
  + **Reduktion des Außenleiterabstandes**
  + **Erhöhung der # der Teilleiter je Außenleiter**
  + **Erhöhung des Außenleiterdurchmessers (Cb )**
  + **Erhöhung des Bündelleiterdurchmesser(Cb )**
  + **Verwendung von erweiterten Teilleiterabständen in Bündeln(EXB)**

## Auswirkungen von Strom und Spannungen auf Personen und Anlagen

* Elektrische und magnetische Felder
  + **Mitte eines Spannfeldes am höchsten** (bis zu 32µT & 13kV/m bei 765kV)
  + Grenzwert DEU 🡪 ständig: 5 kV/m & 100µT
  + Auswirkungen(**ab 40 kV/m 1mT**) 🡪 Stromfluss im Körper 🡪 **Augenflimmern**, Nervenreizung, Herzkammerflimmern
  + Erdmagnetfeld Mitteleuropa: ca. 48µT (Gleichfeld)
  + Bei DC-Spannung noch keine Feldversuche gemacht
* Koronaerscheinungen und –auswirkungen
  + **Erreichen kritischer Randfeldstärke 🡪 lokaler Durchschlag im Dielektrikum (Luft)** 🡪 kurzzeitig & hörbar
  + Konsequenzen:
    - PK – Koronaverluste: 0,7 – 1,5kW/km
    - Ggf. Beeinflussung von Funkempfängern
    - Störende Geräusche (Wohngebiet < 40dB(A)
* Akustische Geräusche
  + Hervorgerufen durch:
    - **Koronaentladungen**
    - **Wassertropfen** am Leiterseil (Wetter & hohe Spannung)
  + Ca. 30-70 dB(A) 🡪 mehr Leiter pro Bündel desto geringere Teilentladung
* Funkstörungen
  + Radio Inteference (RI) beeinflussen Frequenzbänder durch elektromagnetische Wellen 🡪 Abnahme mit seitlichen Abstand von Trassenmitte



## Anforderungen an die Isolation

### Isolationskoordination

* Isolationskoordination := Auswahl der dielektrischen Festigkeit von Betriebsmitteln für gewissen Anforderungen im Netzbetrieb
  + **Stationäre & Dynamische Anforderungen (Betriebs-/Stoßspannungen)**
* **Reduktion der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Schäden** (wirtschaftliche & betriebstechnisch)

### Überspannungen

#### Langsam ansteigende Überspannungen(250/2500 µs)

* **Entfernt eingetretene Blitze oder Schaltvorgänge**
  + Abh.: Netzparameter, Belastung & Netzkonfiguration

#### Schnell ansteigende Überspannungen(1,2/50µs)

* **Blitzeinschläge**
* **Rückwärtige Überschläge** oder direkt in Außenleiter

#### Abstände in Luft zum Vermeiden von Überschlägen

* **Innere Abstände:**
  + **Funkenstrecke in der Leitung** 🡪 zwischen Außenleitern oder zwischen Außenleitern und Stützpunkten (Auslegung der Freileitung)
* **Äußere Abstände:**
  + **Funkenstrecke zwischen spannungsführenden Außenleitern** und Gegenständen unter oder in der Nähe einer Freileitung (Personenschutz)
* Auslegungsprinzipienregel:
  + **Wahrscheinlichkeit des Überschlags sollte längs des kleinsten inneren Abstandes immer größer sein als zu einem äußeren Gegenstand oder einer Person**
  + Eher Phase in Mast als in Personen/Anlagen

# Schutz gegen Auswirkungen von Blitzeinschlägen

## Blitzstromparameter

**Blitzströme sind eingeprägte Ströme** 🡪 10-100µs konstante Stromquelle

* Zw: **900Ω** (Blitzstrom von 50kA) und 200Ω (Blitzstrom von 10kA)
* **Zw Freileitung:** 
  + **400Ω bei 110kV (1 Bündelleiter)**
  + **200Ω bei 420kV (4 Bündelleiter)**
* **Erdungswiderstand: <10Ω** 🡪 Ableitung über Mast als über Entladungskanal

**Blitzparameter (Isolatorauslegung wichtig):**

* **Stromscheitelwert Î** – direkter Blitzüberspannung
* **Maximaler Stromanstieg** – induzierte Spannungen dI/dt (Energieumsatz)
* **Ladungs-Zeit-Integral** 🡪 Energieumsatz am Einschlagpunkt
* **Ladungsquadrat-Zeit-Integral** 🡪 thermische Beanspruchung und Kraftimpuls zwischen Leitern (Querschnitt auslegen)

## Wirkung der Blitzentladung

* Spannung
  + **Direkter** Einschlag in Leiter
  + **Indirekter** Einschlag durch Wollte und influenzierte Ladungen
  + Direkter Masteinschlag 🡪 kritisch bei Überschlag in Phase
* Induzierte Spannung
  + Gegeninduktion

## Blitzschutz

### Schutzraum

* Wenn sich der Kopf der Leitentladung (Blitz) den Objekten auf der Erde bis auf eine bestimmte **Enddurchschlagsstrecke** genähert hat, überbrückt die Fangentladung die **Enddurchschlagstrecke (hB)** auf dem kürzest möglichen Weg
* Je höher die Blitzstromstärke des ersten Teilblitzes, desto größer ist **hB**
  + Hb=f(i)
* Aufgebaute Spannung wird so hoch, bis entladen werden muss. Über Fangstange oder Mast (**U ≈ 3,8MV**)

### Blitzschutzmaßnahmen

* Einsatz des **Fangstabes** 🡪 Erhöhung von hB
* Einsatz einer **Fangleitung**
* Schutzraum wird nie größer als der einer Fangstande der Höhe h=hB
  + Kreishöhe über Fangstange kann nur noch **höher** werden
* Rückwärtiger Überschlag
  + **Falls der Wiederstand zur Erde hoch ist (RM) (sollte < 10Ω)🡪 Rückwärtiger Überschlag über Isolation**
  + Z.B. Nähe vom Umspannwerk ein Leitungsableiter installieren 🡪 **Funkenstrecke über Isolator**, der Überspannung ableitet
* Einsatz von Leitungsableitern bei Erhöhung von Übertragungsspannung
  + Abstände zwischen Phase und gegen Erde anpassen
  + Wegen besseren Fremdschichteigenschaften von Verbundisolatoren 🡪 Einsatz von Isolatoren mit geringeren Kriechweg und kürzere Baulänge 🡪 Geringere Überschlagsfestigkeit 🡪 Einsatz von Leitungsableitern
* Personenschutz
  + **RK≈1000Ω – Gefährdung durch Ieff**
  + **Aufwärtsblitz mit geringer Stromstärke: Bei Direkteinschlag, ist es tödlich, wenn Blitz nicht auf die Luft abspringt**
  + **Naheinschlag ist gefährlich falls Abstand zwischen Füßen hoch ist 🡪 Spannungstrichter**
* Gebirge:
  + **Verzicht auf Erdleiter, da der felsige Untergrund ein zu hohes RE hat**
  + Gefahr des rückwärtigen Überschlags groß

# Erdung von Freileitungen

## Anforderungen von Erdungsanlagen

1. Mechanische Festigkeit & Korrosionsbeständigkeit (Anstrich 20-25 a)
2. Höchste Fehlerströme (aus Berechnungen) **thermisch** (schnell) **standhalten**
3. **Schäden** an Eigentum und Ausrüstung **vermeiden**
4. **Personensicherheit** sicherstellen (z.B. bei Fehler)
5. **Zuverlässigkeit**/Ausfallsicherheit sicherstellen

## Berührspannung

* Berührspannung UT: Körperstrom durch Körperwiderstand
* **Zulässige Berührspannung** UTp: Körperwiderstand
* Leerlauf-Berührspannung: Körperwiderstand + Zusatzwiderstand (Hand und Fuß)
* Zulässige Leerlauf-Berührspannung UvTp
* UT< UTp< UvTp
* Energieumsatz ist das gefährliche für den Menschen E~t

### Berührarten

* Berührungsspannung
* Berührungsstrom
* Unbeeinflusste Berührspannung 🡪 2 gleichzeitig berührbare Teile

## Auslegung von Erdern an HS-Masten

* Auslegung bezüglich Personensicherheit
  + Jeder Erdfehler ist zeitlich begrenzt 🡪 von Hand oder automatisch abgeschaltet
* Maßnahmen für die Einhaltung zulässiger Berührspannungen
  + Prüfverfahren durchführen 🡪 ∆UE<2UD oder UTp<2UD

### Messung von Berührspannungen

1. **Messung mit Berücksichtigung des menschlichen Körpers als Widerstand (≈1kΩ)**
2. **Messung durch treibende Quellspannung UD** 🡪 Voltmeter mit hoher Impedanz & Berührspannung berechnet

### Ergänzende Maßnahmen für die Einhaltung zulässiger Berührspannungen

* Absperrung durch elektrisch **nicht leitende Zäune**
* **Isolierung** der Standortes (Tatanplatten)
* **Potentialsteuerung** (Abbauen der Spg. über mehrere Meter – Potential auf das man steht, auf höheres Niveau erhöhen)

### Inspektion von Erdungsanlagen

* Ca. alle 5 Jahre
  + Sichtkontrolle (Erder & Erdungsleiter)
  + Messung

### Messung von Ausbreitungswiderständen und Erdungsimpedanzen

* Abhängig von Ausdehnung der Erdungsanlage und Höge der beeinflussenden und störenden Spg.

1. **Erdungsmessbrücke**

* Erdungsanlagen kleiner oder mittlerer Ausdehnung 🡪 Abheben des Erdungsseils

1. **Hochfrequenz-Erdungs-Messgerät**

* Messung eines einzelnen Mastes, ohne das Erdungseil abzuheben 🡪 Kettenimpedanz des Erdseils & anderen Masten sehr hoch

1. **Strom-Spannung-Methode**

* Für Messung von Erdimpedanzen großer Erdungsanlagen, aber auch bei Potentialverschleppung (z.B. Metallrohre) 🡪 Große Entfernung zwischen Erdungsanlage und geprüfter Mast erforderlich

# Leiter, Isolatoren und Armaturen

## Leiter

* Wirtschaftlich & Zuverlässig
* **20-50% Errichtungskosten** inkl. Verlegung

### Auslegungskriterien:

* Leitfähigkeit & thermisches Verhalten
* **Thermische Grenzleistung**
* **Wirtschaftlichkeit der Übertragung**
* **Mechanische Festigkeit** (Eislast,...)
* Spannungs-Dehnungsverhalten(Durchhang)
* Kriechverhalten und resultierende Durchhangzunahme
* **Schwingungsverhalten** und Dauerwechselhaftigkeit (Wind)

### Aufbau

* Kern: **Stahldrähte** (Zugkraft)
* Außen: **hart gezogenes Alu** (Stromtragfähigkeit, leicht)

### Grundwerkstoffe

#### Alu- und Aluminiumlegierung

* **Leitfähigkeit 61% von Kupfer**
* **¼ des Gewichts** von Kupfer
* **AlO2-Schicht 🡪 Schutz vor Korrosion**
* Gute Beständigkeit in aggressiver Umgebung (Meeresluft)
* Plastische Verformung 🡪 Kriechverhalten
* **Längt sich stark unter Eigengewicht**
* **Max. 80°C**, darüber hinaus löst sich die Fett-Schutzschicht auf
* **Max. 680 A**

#### Stahl & Al-ummantelter Stahl

* Verzinkte Stahldrähte 🡪 In AlSt-Verbundseilen
* Aufsintern von Al und anschließendes Ziehen
* Hohe Festigkeit und gute Korrosionsbeständigkeit & Leitfähigkeit
* Verwendung von Erdleiter und große Spannweiten > 2000m

#### Kupfer & Kupferlegierung

* Einsatz vor allem im Bahnbereich
* Geringe Spannweiten

### Verseilung

* **Wendelförmig um einen Kerndraht** mit wechselnder Schlagrichtung
* Ein- oder mehrlagige Leiter

### Hochtemperaturleiter

#### Konventionelle Hochtemperaturleiter (TAl-Leiter)

* Zugabe von **Zirkon** (AlZr) 🡪 thermische Belastbarkeit auf **150 Grad**
* +50% bis +60% gegenüber Al/St
* Masterhöhung i.A. erforderlich
* 1,8x Kosten Standard-Leitern (9000€/Phase/km + Mastkosten)
* **Beispiel:**
  + Tal/Stalum (Thermal resistant Aluminium)
    - Al-Zirkonlegierung 🡪 Anhebung der Rekristallisationstemperatur & Anhebung auf 150 Grad und 1kA
  + ZTAl/HACIN
    - Ebenfalls Zirkonlegierung 🡪 210 Grad
    - Durchhang geringer als bei TAl-Leiter
* **Vorteile:**
  + **Höhere Strombelastbarkeit**
  + Gleiches Korrosionsverhalten & mechanische Eigenschaft wie E-Al
  + **Kurzschlusstemperatur 260 Grad**
  + Wirtsch. Sanierung von bestehenden Anlagen
  + Schaffung von Ausfallreserven

#### Hochtemperaturleiter > 200 Grad (z.B. ACCC, ACCR)

* Alu-Legierung
* Strombelastbarkeit bis zu 100%
* **3-8x Kosten**

##### **ACCR (Aluminum Conductor Composite Reinforced)**

* Aluminium Oxide Keramik
* Aluminium Zirkonium Legierung (Hochtemperaturbeständigkeit)
* **Hohe Strombelastbarkeit 2x** (Hochtemperatur)
* **Keine Masterhöhung**
* Betriebserfahrung
* **Investitionskosten (6-8x höher)**
* Elektrische Verluste bei hoher Auslastung

##### **ACCC (Aluminium Conductor Composite Core)**

* Glasfaser über Kohlefaser, ausgeglühtes Aluminium
* Nicht schwerer + gleicher Leiterquerschnitt + gleiches Gewicht + mehr Strombelastbarkeit
* **Hohe Strombelastbarkeit 2x (Hochtemperatur)**
* **Keine Masterhöhung**
* Geringe Verluste als bei Al/St 🡪 größerer Al-Querschnitt
* Betriebserfahrung
* **Investitionskosten (6-8x höher)**
* **Elektrische Verluste bei hoher Auslastung**

### Ab wann sinnvoll:

* Hohe Strombelastbarkeit erforderlich
* **TAL, Monitoring, Masterhöhung, Tausch gegen größere Leiter und wirtschaftlichere Alternativen müssen ausscheiden**

### Prüfen von Drähten und Verbundleitern

* **Vor Verseilen:**
  + DIN Normen prüfen
  + 10% des Lieferloses prüfen
* **Nach Verseilen**
  + Typprüfung an einer Probe vor Fertigungsfreigabe
  + Einhaltung der Masse ohne Fett <±2%
* **Maße & Oberfläche**
  + Durchmesserabweichung (bis 3mm)
  + Glatte Oberfläche, frei von Rissen, Löchern, Einschlüssen
* **Schweißstellen**
  + In beschränkten Umfang
  + Güte muss nachgewiesen werde
* **Zugfestigkeitsprüfung**
  + An jeder Probe durchzuführen
  + Vor Zugfestigkeitsprüfung wird an gleicher Probe eine Bruchdehnung gemessen
* **Wickelprüfung**
  + Wicklung von 8 Wicklungen auf einem Dorn mit Durchmesser = Aludraht
  + 6 Wicklungen auf- und abgewickelt
* **Spannungs-Dehnungs-Diagramm**
  + Mindestabspannlänge: 400 x Leiterdurchmesser, min 10m
* **Prüfung des Kriechverhaltens**
  + Plastische Verformung durch Eigengewicht an 100x-Leiterdurchmesser e=F\*tn (t: Zeit in h, F/n abhängig vom Leitertyp)
* **Schichtdickenmessung**
  + Ablösen der Zinkschicht (verzinkte Stahldrähte) mit Salzsäure
  + Messung nach Volumen- oder Gewichtsmehode
  + Gleichmäßigkeit 🡪 Kupfersulfatlösung eintauchen
* **Spezifischer Widerstand**
  + R20=RT/(1+alpha(T-20))
    - Umrechnung auf Bezugstemperatur von 20 Grad

### Verschleiß & Ermüdung des Leiters durch Wind bedingte Schwingungen

* **Vorzugsweise an Klemme – Leiter**
* Abhängig von Biegespannung (omega)b und Schwingungsamplitude Yb 🡪 Drahtbrüche
* Einsatz von **Schwingungsdämpfern**/Zugkräfte erhöhen

### Verlegung

* Vorseil aufziehen und Leiterseil daraufhin spannen
* **Anstückstellen sind Schwachstellen** 🡪 komplettes Leiterseil für geplante Strecke fertigen ohne Verbindungsstücke/Anstückstellen zu nutzen
* Abstandhalter durch Personal, dass die Leitung entlang fährt, montiert
* Rollen zum Verlegen 🡪 an Isolatoren angebracht

## Isolatoren

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Kappenisolator** – Keramik o. vorgespanntes Glas | **Vollkernisolator** | **Langstabisolator** – mit Pfannenkappe o. mit Gabelkappen | **Kunststoffisolator -** mit versch. Endarmaturen |
| Macintosh HD:Users:Paddy:Desktop:Bildschirmfoto 2013-01-27 um 14.35.51.png | Macintosh HD:Users:Paddy:Desktop:Bildschirmfoto 2013-01-27 um 14.36.04.png | Macintosh HD:Users:Paddy:Desktop:Bildschirmfoto 2013-01-27 um 14.36.14.png |  |

### Silikonisolierte Freilustisolatoren (1-1100kV)

* Aufbau: **glasfaserverstärkter Kunststoff**. **Gekrimpte(angepresste) Armaturen**, Silikonschirmung
* Spannungsebene: 1 – 1100kV
* Oberflächeneigenschaften: Hydrophobie, Erosions- und Kriechspurbeständigkeit

### Lichtbogenschutzarmatur

* **Sofortübernahme aller Lichtbogenfußpunkte**
* Überführen der Lichtbogenfußpunkte
* **Wegrichten des Lichtbogenstieles** von Isolator und Leiterseil
* Vermeiden des schnellen Abbrennens von Endbrennstellen-Elektroden
* Konzeptionen: Lichtbogenführung in stabilen Brennzustand 🡪 Vereinigung der Teillichtbögen zum Volllichtbogen

### Alterungsverhalten - Frühphase

* **Alterungsfrühphase (AFP)**
  + Hydrophobieverlust 🡪 elektrolytische Fremdschichtablagerung
  + Hydrophobiewiederkehr
  + Hydrophietransfer 🡪 Transfer der Hydrophobie auf Verschmutzungssichten **(Diffusion niedermolekularer Stoffe verantwortlich)**

#### Prüfverfahren

* **Radtauchtest** (4 Phasen)
  + Aufwendig, Große Messwertstreuung, Bildung Abtropfkanten,
* **Nebelkammerprüfverfahren** (Nordseeluft)
  + Zeitaufwand, Große Messwertstreuung
* **Dynamischer Tropfen Test** (Wasser + schiefe Ebene)
  + Einfache Prüflingsgeometrie, Gute Reproduzierbarkeit

#### Analysegrade Hydrophobietest

* **HC 1** (kleine Tropfen) bis **HC 6** (feuchte Zone >90% d. Oberfläche,)
  + **4s lang 2mA bedeutet technisch tot**
* Analyse des Betriebsverhalten 🡪 Messung des Tropenrandwinkels
* Elektrodynamische Prüfvorgänge: Tropfenverformung durch externe Feldeinwirkung

### Schwingungsdämpfer

* **Wind erzeugte Schwingungen rausnehmen** 🡪 keine Leiterseil-/Isolationsbrüche
* **Gewicht mechanisch mit dem Seil verbunden** 🡪 **Dämpft die Frequenz**

### Trippelpunkt

* Vermeiden: Trippelpunkt + Tropfenkorona (~8x Grundfeldstärke an Spitzen)

### Alterungsverhalten – Spätphase

* **Alterungsspätphase (ASP)**
  + Bildung von **Ableitströmen über Fremdschichten**
  + **Trockenzonen** + Ausbildung von Vorlichtbögen
  + **Oberflächenentladung mit Entstehung leitfähiger Kanäle**
  + **Erosions- und Kriechspurvorgänge** 🡪 Komponentenausfall, wegen Abtragung des Materials

#### Prüfverfahren

* Erosions- und Kriechspurbeständigkeit
  + Schiefe Ebene Test
  + Bei Küstengebieten (Meeresluft) keine Kriechwegreduktion bei Silikonisolatoren 🡪 Schäden am Material, wegen Teilüberschlägen

## Armaturen

### Elektrisches Verbinden

* **Stromschienen-Verbindung, Verbindungsarmaturen, Abzweigarmaturen**, Anschlussarmaturen
* Verbinden durch: Schrauben, Klemmen, Pressen, Schweißen (nie 100%tig perfekt)

### Mechanisches Verbinden

* **Abspannarmaturen, Tragarmaturen, Leitungsträger, Abstandhalter**
* Verbinden durch: Schrauben, Klemmen, Pressen, Verkeilen

### Beispiele

* Tragklemme
* Abspannklemme
  + Spannkraft verteilen
* **Feldabstandhalter**
  + **Reduzierung der Teilfeldschwingungen 🡪 Abstand zwischen Teilleiterbündeln**
* Schwingungsdämpfer
  + Schwingungen durch Wind kompensieren 🡪 Drahtbrüche
* Seilverbinder

### Alterungsverhalten & Güte

* **Kontaktmodell**
  + Verbindung 2er Leiter 🡪 **Oberflächenrauigkeit führt zu keinem 100% Kontakt beider Leiter**
  + **Fremdschichtbildung 🡪 Widerstand höher**
  + Kriechalterung 🡪 Rverb steigt, da Kontakt durch Lösung der Schraubverbindung steigt
  + Gütefaktor: elektrische Kontaktgüte eines elektrischen Kontaktes – bezogen auf Leiterstück ohne el. Verbindung
    - * größerer Al-Querschnitt bei Verpressung
* **Alterungsmechanismen**
* Zustandserfassung
  + **Infrarot-Messung**
    - **In-Betrieb Messung** 🡪 keine Abschaltung notwendig
    - Diagnose über Restnutzungsdauer möglich
    - Temperatur lässt Rückschlüsse auf Gütefaktor schließe
    - **Steigendes I 🡪 steigende Verluste/Wärme 🡪 sinkende Verbindungsqualität 🡪 höherer Gütefaktor 🡪 beschleunigte Alterung**
    - **Anfangsgütefaktor stark ausschlaggebend**

# Leitungstechnische Berechnung

## Mindestabstandshöhe/Durchhang

### Einflussgrößen

* **Temperatur, Stromstärke** 🡪 Ausdehnung, Zugkraft
* Standard(worst case) konservative Annahme: **35°C 0,6 m/s, 900 W/m²**

### D:\Alex\Studium\WS 12 13\Freileitungen\zugkraft.jpegKräfte

* **Horizontale Kraft sinkt mit steigender Temperatur**
* f ~ (Spannweite²/Zugkraft) 🡪 geringere Zugkraft nur geringen Einfluss
* typisch für 400kV 400-800m Spannweite;
* FH ≈ 14kN

## Zustandsgleichung

* **Relation zwischen zwei Zuständen**
* Beinhaltet Leiterzugkräfte, Leitertemperatur, Leitermasse(Schnee/Eis)
* Anwendbar auf Abspannabschnitte mit n Masten
* Bei unterschiedlichem Durchhang 🡪 ideelle Spannweite

### Ungleiche Mastfelder

* Längster Abschnitt hat den größten Durchhang
* 🡪 **ideelle Spannweite**
* Rollen erlauben dem längsten Abschnitt Ziehen

### Relationen

* **1K Temperaturerhöhung** 
  + **6 cm mehr Durchhang**
  + **1% mehr Strombelastbarkeit**
* **Abgeführte Energie**
  + Pc: Konvektion
  + Pr: grauer Strahler
* **Zugeführte Energie**
  + PJ: Joule’sche Erwärmung
  + Ps: Sonnenstrahlung

## Strombelastbarkeit

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 110kV | 220kV | 380kV |
| 120MVA | 520MVA | 1700MVA |

# Optimierung

## Leistungserhöhung

* AC 🡪 DC
* **Übertragungsspannung erhöhen**
* **Hochtemperaturleiter**
* **Wellenwiderstand minimieren**
* **Freileitungs-Monitoring (witterungsabhängiger Betrieb)**

### Spannung erhöhen

* Vorteile
  + **Höhere Übertragungsleistung** bei gleichbleibendem Leiterquerschnitt
  + **Ohm’sche Verluste minimieren**
  + **Schnelle Lösung**
  + Erhöhte Netzstabilität
  + 20% der Kosten für eine neue Leitung
* Nachteile
  + **Isolation** muss erhöht werden
  + **Höherer Bodenabstand (ggf. höherer Mast)**
  + Korona Schallpegel erhöht

## Wellenwiderstand und natürliche Leistung



### Verringerung des Wellenwiderstandes (High Surge Impedance Loading (HSIL))

* L und C so beeinflussen dass Zw runter und Pnat rauf geht
* Vorteile:
  + **Erhöhung der Wirkleistung**
  + Geringere Blindleistung
  + **Geringerer Spannungsabfall**
  + Geringerer Übertragungswinkel
* Verringerung durch:
  + **Mehr Leiter pro Phase**
  + Phasenabstand ändern
  + **Phasen aufteilen / Zyklisch tauschen**
  + **EXB (erweiterte Bündeltechnologie)**

## Hochtemperaturleiter (ACCC/ACCR)

* **Glasfaser über Kohlefaser, ausgeglühtes Aluminium** (ACCC)
* **Alu Oxid Keramik, Ali Zirkonium Legierung** (ACCR)

### Bestehende Systeme

* **Müssen der thermischen/mechanischen Belastung standhalten**
* Alle Komponenten des Systems müssen den maximalen Strom tragen können
* Schutzsysteme anpassen
* Blindleistungsbilanz, EMF (max. 100µT), Systemimpedanz, n-1 Sicherheit berücksichtigen
* Ggf. Masterhöhung / Genehmigungen

### Vorteile/Nachteile

* Vorteile:
  + **Betriebstemperaturen >210°C**
  + Hohe Dauerstrombelastbarkeit
  + Je nach Material, geringeren Durchhang
* Nachteile:
  + **Höhere I²R Verluste**
  + **Höhere magnetische Feldstärken**
  + **7x höhere Investitionskosten**
  + **Keine Dauerbetriebserfahrung**
  + Regeleinheit/Phasenschieber erforderlich

## Freileitungs-Monitoring

**Bestimmung der klimaabhängigen dynamischen Strombelastbarkeit durch Überprüfung und Anpassung der Stromkreiskomponenten**

### Überwachung der Freileitung

* **Daten messen 🡪 Auswerten 🡪 Entscheidung treffen**
* **Temperatur, Überlastung, Windgeschwindigkeit**
* Mittels Temperatur auf die Belastung schließen (unter 80°C bleiben für AL/Stahl)

### Zu Beachten

* Gesamter Stromkreis muss auf max. Belastung ausgelegt sein
* Ggf. Anpassung des Leistungs-/Umspannwerks-/Schutzbereichs
* Wetterdaten ermitteln
* N-1 Sicherheit gewährleisten
* **Ohne Monitoring schon ab 100% abschalten**

### Bestimmung der Zustände

* **Temperatur messen** (lokal und verteilte über LWL)
* **Zugspannung messen**
* Ortung der Ziele
* Vibrationsanalyse (Leiterschelle, Zugmessdose, Dehnungsmesstreifen)
* Wetter-/Kimadaten

### Zugspannungsmessung

* **Kraftmessung am Abspannisolator**
* **Korrektur der horizontalen Zugkraft**
* Berechnung des Durchhangs für jeden Abschnitt
* Wichtigste Netzbetriebsgröße: Stromstärke

### Position

* GPS, Laser, Radar

### Vibrationsanalyse

* Schwingungen im Spannfeld messen
* Durchhang anhand der Frequenz bestimmen
* Stromtragfähigkeit anhand des Durchhangs bestimmen

### Stromtragfähigkeit und Wetterbedingungen (Berechnung: Cigre Modell)

* **Strombelastung abhängig von Leiter- und Umgebungstemperatur und Wind**
* Bei gleich bleibendem Strom aber geringerer Umgebungstemperatur/Windgeschwindigkeit 🡪 geringere Leitertemperatur
* **Lokale Unterschiede beachten**

## Verbinder-Prüfung

* **IR-Thermographie**
* Zustandserfassung (vor allem Pressverbinder)
* **Ermittlung der Restnutzungsdauer in Abhängigkeit der voraussichtlichen Strombelastung**
* **Erstmontage ausschlaggebend**
* **Schlechte Montage 🡪 Schmutzschicht zwischen Verbundmedien 🡪 sinkende Lebensdauer**

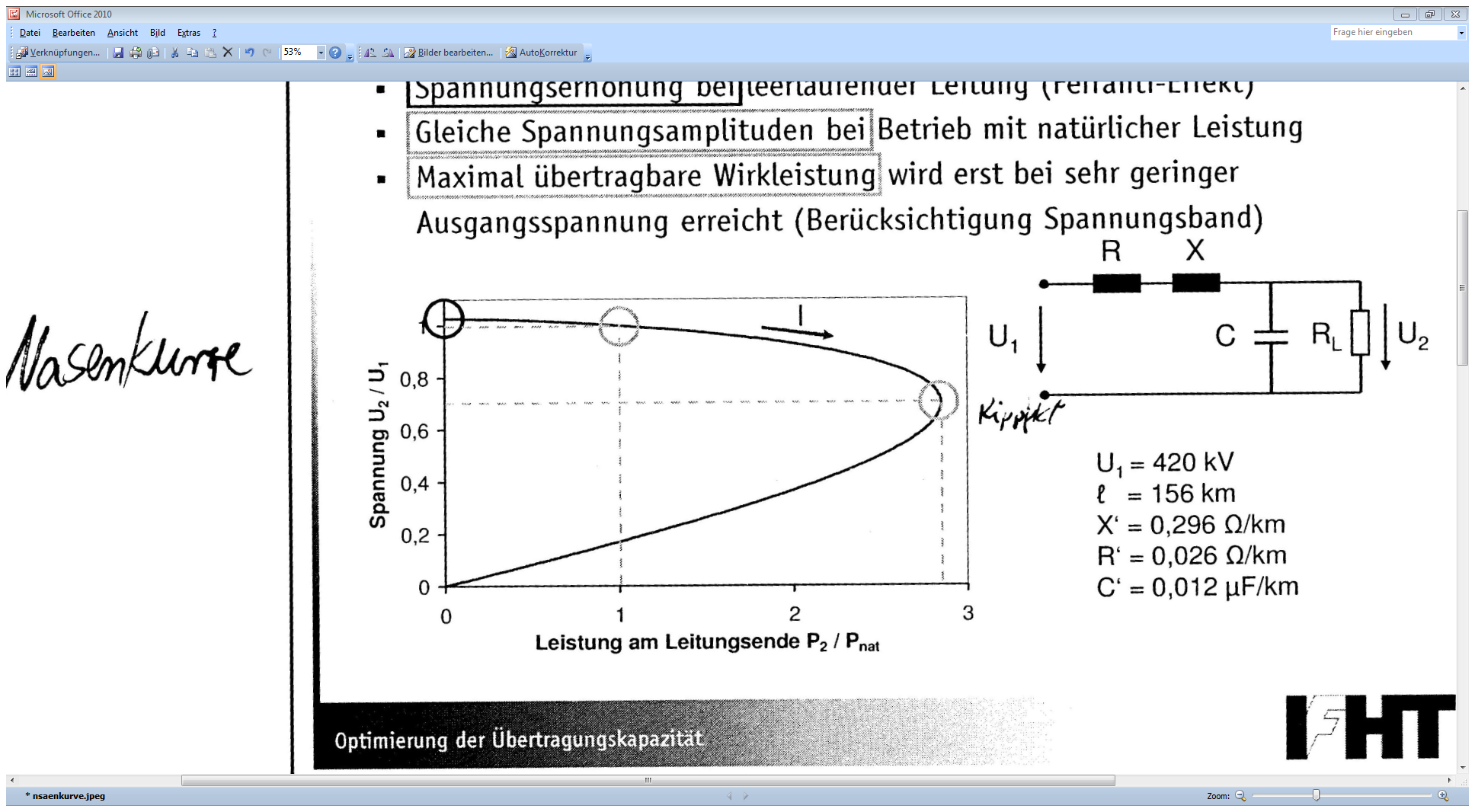
## Grenzen der Strombelastbarkeit

* Bestimmbar durch Freileitungs-Monitoring im Netzbetrieb und Klimdadatenauswertung
* **Mindeste verfügbare Kurzschlussströme der 110kV Ebene**
  + **Ströme nahe dem Kurzschlussstrom lösen Schutzschalter aus**
* **Maximale Betriebsströme der 220/380 kV Ebenen (Spannungsband)**
* Thermische Erhitzung
* ENTSO-E Abstimmung
* Magnetisches Feld < 100µT

## Spannungsstabilität

* **Spannungserhöhung bei leerlaufender** Leitung (Ferranti Effekt)
* Gleiche Spannungsamplitude bei natürlicher Leistung
* Maximal übertragbare Wirkleistung (**erst bei geringer Ausgangsspannung**)

Nasenkurve



**Parallelkompensation (MSCDN) durch zusätzliche, parallelgeschaltete Kondensatoren** am Leitungsende 🡪 Stützung der Spannung bei hohen Leistungen (Spannungsband)

## Strombelastbarkeiten für Netzplanungsberechnungen

* Übertragungskapazität ermitteln (Studien: dena II)
* Belastbarkeiten abhängig vom Klima/Wetter/Windeinspeisung
* 🡪 Monitoring einsetzen
* Minimale Belastbarkeit bei 80% Windeinspeisung statistisch abgesichert