



Primär-

Technologie im Vergleich

Schaltanlagen

Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS

T&D

Freileitung ↔ Erdkabel

Umspanner

Flüstertransformator ↔ Einhausung

Erfahrungen und Trends

für der Bereich

Nennspannung U_n / höchste Spannung der Anlage U_m

= 110 / 123 kV ... 380 / 420 kV

ANLAGENTECHNIK DER ZUKUNFT

Technologie im Vergleich



Resümee vorweg

IDEALE Technologie gibt es nicht

KEIN Vorteil **OHNE** Nachteil

ziel- und zweckorientiertes **NEBENEINANDER der Technologien**

Gedanken zu

High-Tech-System in der Primärtechnik

Ziele und Trends

Effizienz

Ausnützung an der Grenze

Kompaktheit - Miniaturisierung

Low-Cost

Smart

FORTSCHRITT → ABHÄNGIGKEIT



Überblick

- **Bestimmungen** - Anforderungen
- **Strukturen von Schaltanlagen**
- **Bemessungsspannungen**
- **Bemessungsströme**
- **Isoliermedien** - (dielektrische) Eigenschaften, Mindestabstände
- **Platzbedarf** - Grundfläche, Volumen
- **Schaltanlagen im ungestörten Betrieb**
- **Instandhaltung** - Freischaltung, Trennstrecken, Erdung
- **Errichtung, Ertüchtigung, Erweiterung**
- **Schaltanlagen im gestörten Betrieb** - Störungsanalyse, Störungsbehebung, Wieder-Inbetriebsetzung



Bestimmungen

- ÖVE/ÖNORM **EN 61936-1** Ausgabe: 2015-01-01
Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV
Teil 1: Allgemeine Bestimmungen
 - 4. Grundlegende Anforderungen
 - 5. ff Anforderungen an Isolation, Betriebsmittel, Anlagen, Schutzmaßnahmen, Hilfseinrichtungen, Erdungsanlagen, Inspektion und Prüfung

- ÖVE/ÖNORM **E 8383** Ausgabe: 2000-03-01
Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV
gemäß Elektrotechnikverordnung 2002 Novellierung 2014 **verbindlich → Gesetz**

- ÖVE/ÖNORM **EN 50522** Ausgabe: 2011-12-01
Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV



EN 61936-1 - Anforderungen (1)

▪ 4.1.1 Allgemeine Anforderungen

Anlagen und Betriebsmittel müssen den **am Einsatzort zu erwartenden** elektrischen, mechanischen, klimatischen und Umwelt-**Einflüssen standhalten**.

Die Auslegung muss berücksichtigen:

- den Zweck der Anlage;
- die Anforderungen des Betreibers, wie z. B. Spannungsqualität, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Fähigkeit des elektrischen Netzes, den Einflüssen von vorübergehenden Beanspruchungen standzuhalten, wie Anlauf von großen Motoren, kurze Leistungsausfälle und Wiederherstellung der Versorgung;
- die Sicherheit für Betriebspersonal und die Öffentlichkeit;
- den Klimaeinfluss;
- die Möglichkeit für Erweiterungen (wenn gefordert) und für Instandhaltung.



EN 61936-1 - Anforderungen (2)

▪ 4.2 Elektrische Anforderungen

Sternpunkterdung, Klassifizierung der **Spannung**, **Betriebsstrom**, **Kurzschlussstrom**, Bemessungsfrequenz, Korona, Elektrische und magnetische Felder, Überspannungen, Oberwellen.

▪ 4.3 Mechanische Anforderungen

Betriebsmittel und Tragkonstruktion → Normal-Lastfall, Ausnahme-Lastfall
Zuglast, Montagelast, **Eislast**, **Windlast**, Schaltkräfte. **Kurzschlusskräfte**,
Wegfall eines Leiterzugs, Schwingungen
Bemessung der Tragkonstruktion

▪ 4.4 Klima- und Umweltbedingungen

Normale Bedingungen → **Innenraum**, **Freiluft**

Besondere Bedingungen → Aufstellungshöhe, Verschmutzung, Temperatur und Luftfeuchte, Schwingungen

▪ 4.5 Besondere Anforderungen

Geräusch
Transport



Strukturen von Schaltanlagen

EN 61936-1

- 7 Anlagen

- 7.1.1 Schaltung

Die Schaltung ist so zu wählen, dass den **Betriebserfordernissen** entsprochen wird und die **Sicherheitsanforderungen** nach 8.3 (Schutz bei indirektem Berühren, Erdung, Potentialausgleich) erfüllt werden können.

Die **Weiterführung des Betriebes unter Fehler- und Instandhaltungsbedingungen** ist unter Beachtung der Netzkonfiguration ebenfalls zu berücksichtigen.

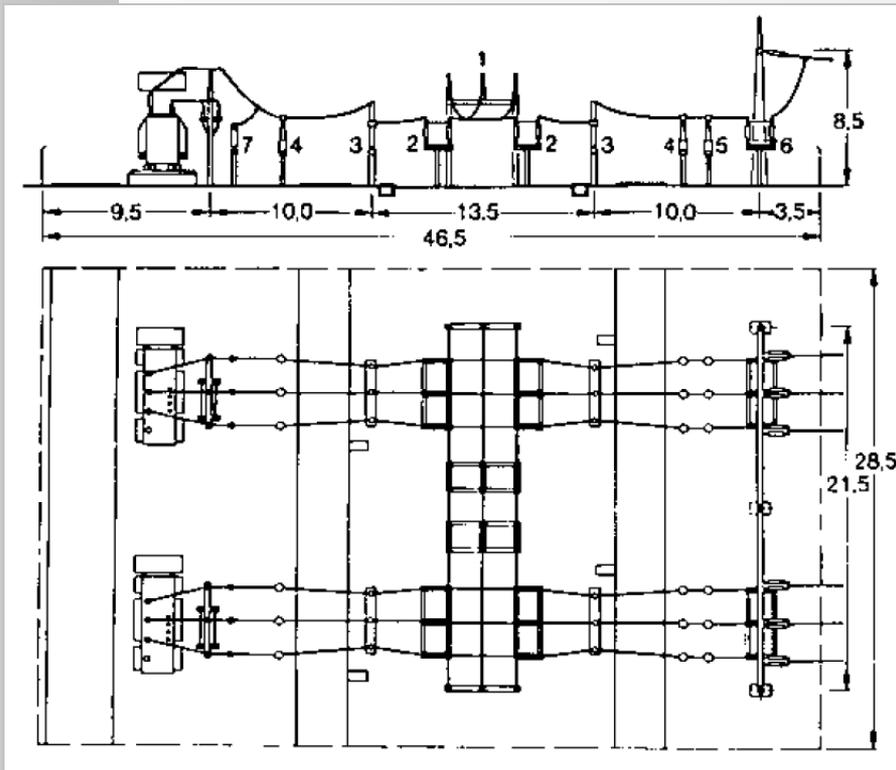
Die Schaltung muss so aufgebaut sein, dass **Schalthandlungen sicher und schnell** vorgenommen werden können.

Technologie im Vergleich

Schaltanlagen Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS



Strukturen von Schaltanlagen (1)



Quelle: ABB Schaltanlagen-Handbuch

H-Schaltung

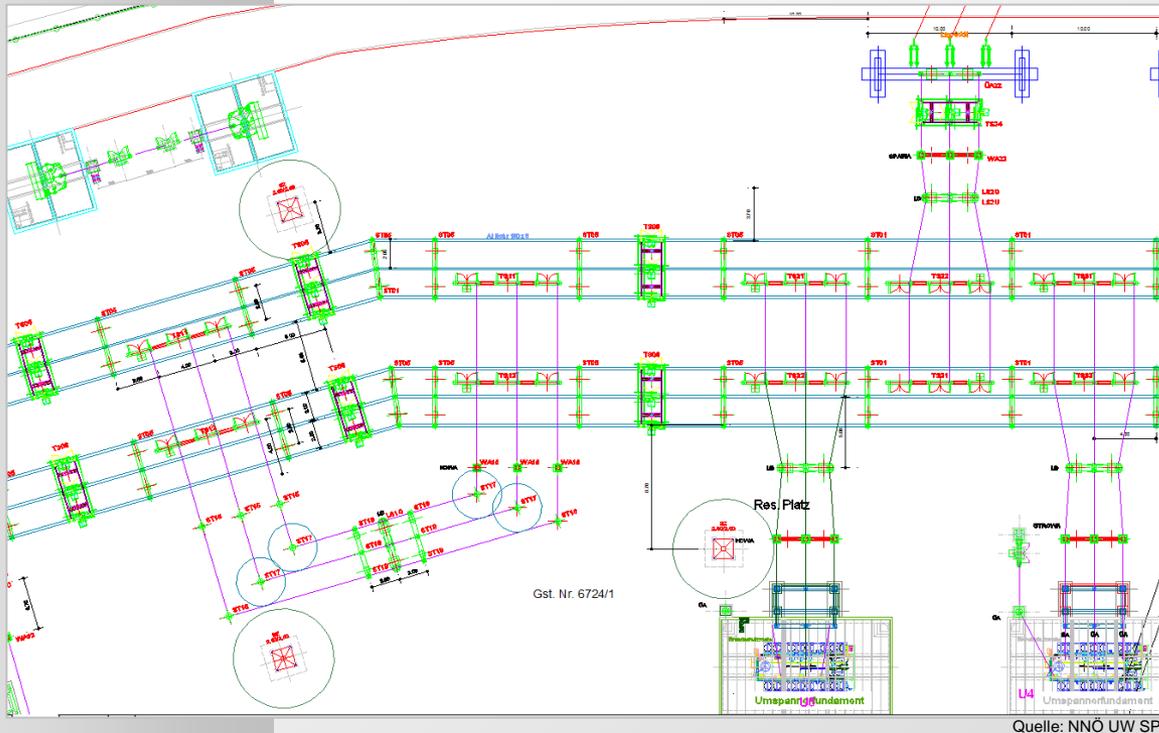
- **Einfachsammelschiene mit Längstrennung / -kupplung**
 - Längs-Trennschalter
 - Revisions-Trennschalter
- **Trennschalter** in Parallelbauweise
- **Schalt-Optionen**
 - Leitungen parallel / durchgeschliffen
Umspanner parallel
 - Leitungen getrennt / Netztrennung
Umspanner getrennt
 - nur eine Leitung
Umspanner direkt oder ausgekreuzt
 - ...

Technologie im Vergleich

Schaltanlagen Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS



Strukturen von Schaltanlagen (2)



Zweifach-Sammelschiene

- **10 Trenner-Kupplung**
 - 3 Längstrennungen / -kupplungen
 - Quer-Kupplung mit Leitungsschalter und Wandlern
- **Umspannerabzweig**
 - SS-TS, LS, W, Umspanneranbindung
- **Leitungsabzweig**
 - SS-TS, LS, W, L-TS, ÜA, L-Zuspannung
- **Trennschalter**
 - Sammelschienen-Längstrennschalter in Parallelbauweise
 - Sammelschienen-Trennschalter Wurzelverbindungen in Kiellinienbauweise
- **Schalt-Optionen**
 - ...

Technologie im Vergleich

Schaltanlagen Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS



Strukturen von Schaltanlagen (3)



Quelle: NNO UW SPA

Dreifach-Sammelschiene + Hilfsschiene(n)

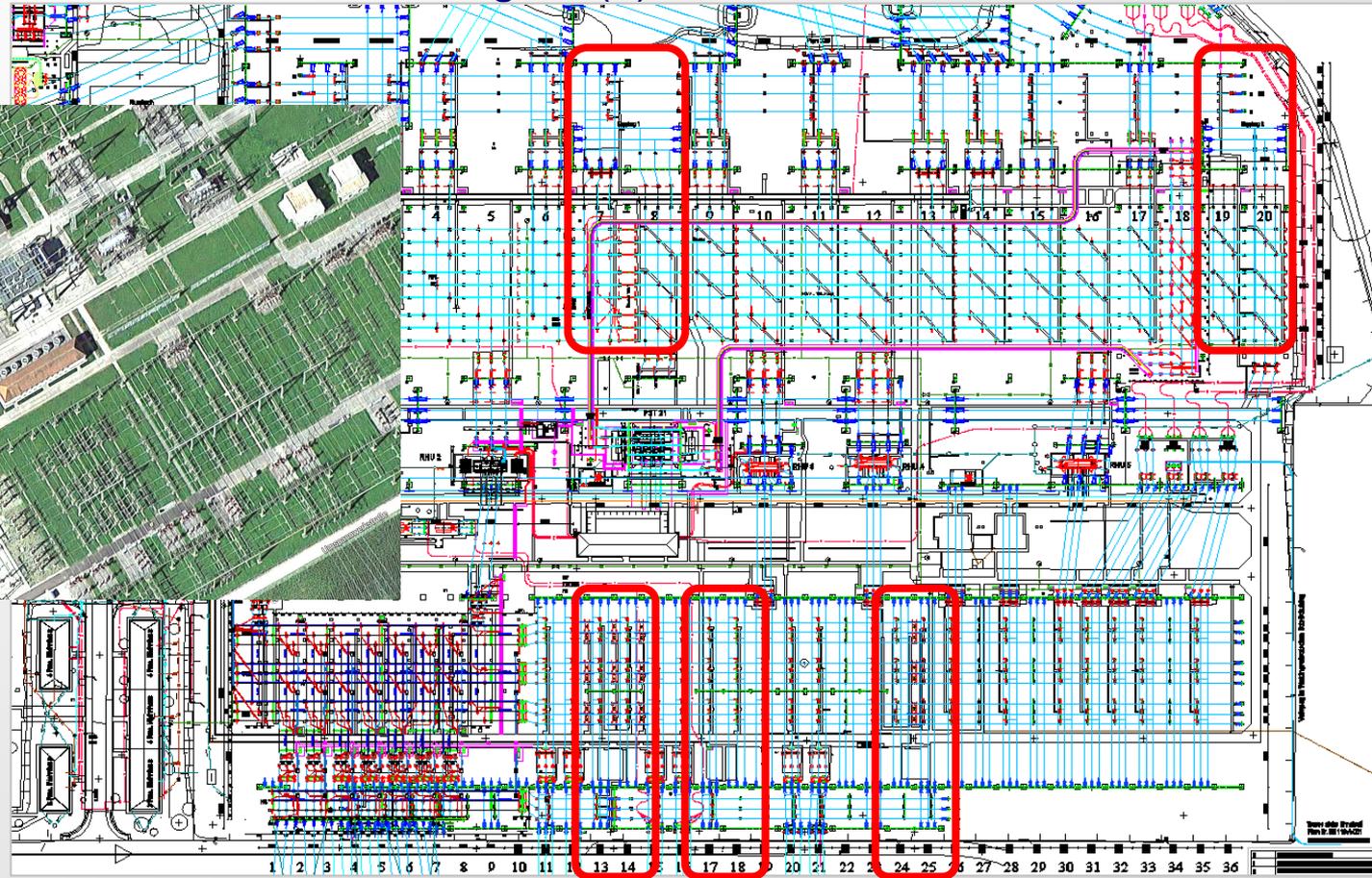
- mehrere Kupplungen
- Umspannerabzweig
- SS-TS, LS, W, Umspanneranbindung
- Leitungsabzweig
- SS-TS, LS, W, L-TS, ÜA, L-Zuspannung
- Schalt-Optionen
- ...

Technologie im Vergleich

Schaltanlagen Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS



Strukturen von Schaltanlagen (3)





Bemessungsströme gestern – heute – morgen (1)

Betriebsströme

- wirtschaftlich 250 A ... **1000 A** ... **4000 A**
- **gestern** SS, KU 800 A ... 1600 A LA, UA 500 A ... 1000 A
- **heute** **SS, KU 1600 A ... 4000 A** **LA, UA 1000 A ... 2500 A**
- **morgen ?** SS, KU 3150 A ... 8000 A LA, UA 2000 A ... 4000 A

Kurzschlussströme I_{k3}“

prospektiver Anfangskurzschlusswechselstrom

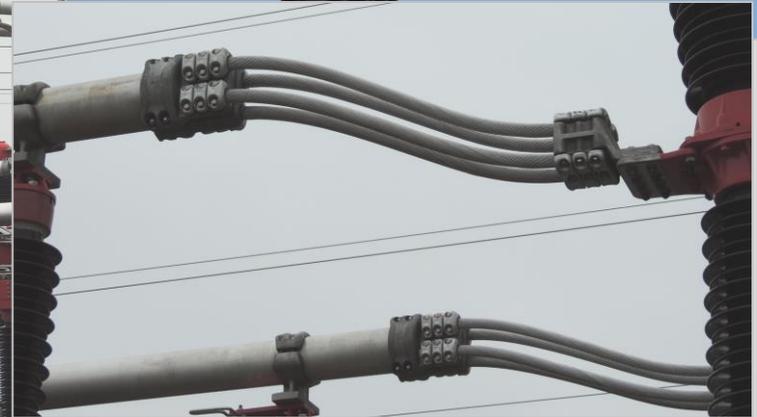
- wirtschaftlich ... kA ... **40 kA** ... **50 A**
- **gestern** 16 kA ... 31,5 kA
- **heute** **26,2 kA ... 50 kA**
- **morgen ?** 31,5 kA ... 80 kA

Technologie im Vergleich

Schaltanlagen Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS



Bemessungsströme gestern - heute - morgen (2)





Isoliermedien (dielektrische) Eigenschaften

Luft ↔ SF₆ ABB-Gas

- **Druck** Atmosphärendruck ↔ einige bar
keine Leckverluste ↔ Leckverluste → Drucküberwachung
- **Qualität** große Bandbreite ↔ enge Bandbreite
natürlicher Zustand ↔ hochrein
Umwelteinflüsse:
 - Feuchtigkeit, ↔ feuchtigkeitsempfindlich
 - Verschmutzung, ↔ empfindlich → TE
 - Strömung, ↔ Mindesttemperatur - Verflüssigung
 - Temperatur ↔ Mindesttemperatur - Verflüssigungselbst regenerierend
- **System-Verhalten** Über-/Durchschlagstrecken ↔ Über-/Durchschlag → Überdruck
bei oftmals **selbstheilend** ↔ Druckentlastung per Berstplatte
dielektrischer ↔ Gas-Verlust
Störung ↔ Stör-LB-Erkennung → Abschaltung
↔ **Ausfall Schottraum → Anlage**

Technologie im Vergleich

Schaltanlagen Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS



Isoliermedien Mindestabstände

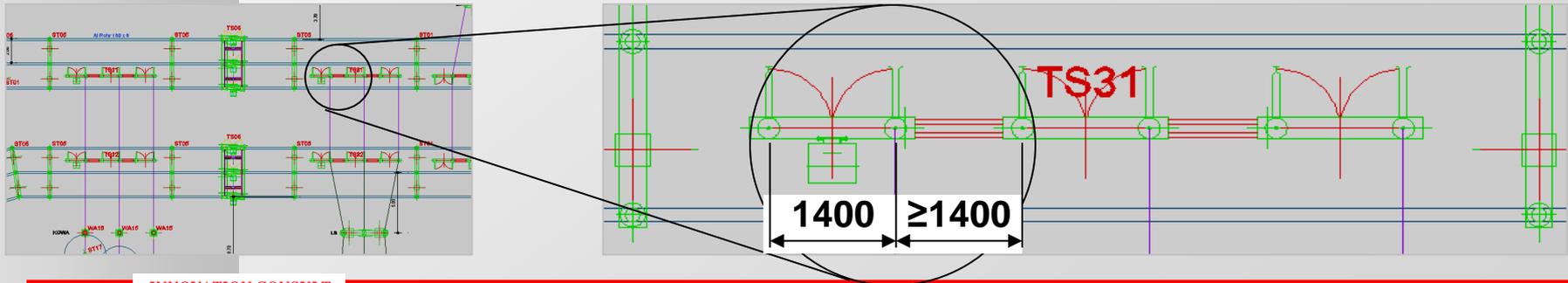
Basis für Sicherheitsabstände N

Luft ↔ SF₆ ABB-Gas

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ 110/123 kV Leiter/Leiter N = 1100 mm Up = 550 kV Leiter/Erde N = 1100 mm | <ul style="list-style-type: none"> ↔ dreiphasige SS ~100 ... 200 mm ↔ ~100 ... 200 mm |
|--|---|

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ 380/423 kV L/L homogen 3600 mm Up = 1050 kV L/L inhom. 4200 mm L/E homogen 2600 mm LE inhom. N = 3400 mm | <ul style="list-style-type: none"> ↔ einphasige SS ~200 ... 300 mm |
|--|---|

- **durch Trennstrecken getrennte Anlagenteile**
 - Trennschalter = typ-geprüfte Zone → Mindestabstand Leiter/Leiter
 - nicht geprüfte Zone → 1,25 x Mindestabstand Leiter/Leiter



Technologie im Vergleich

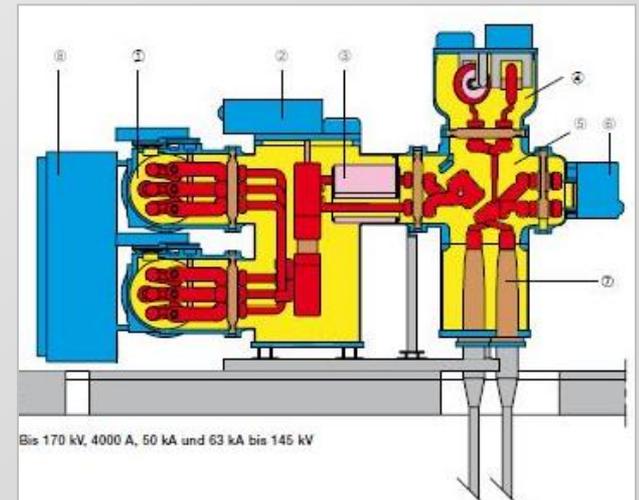
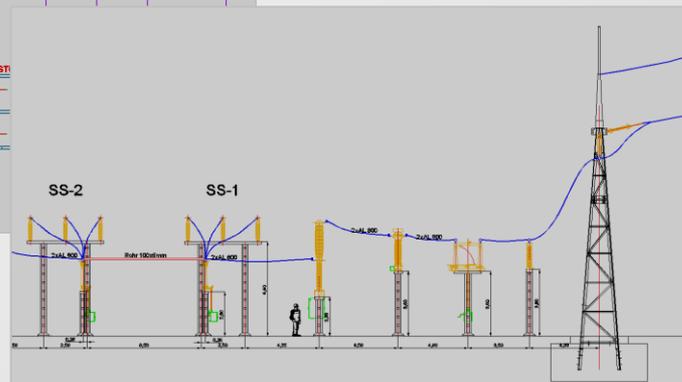
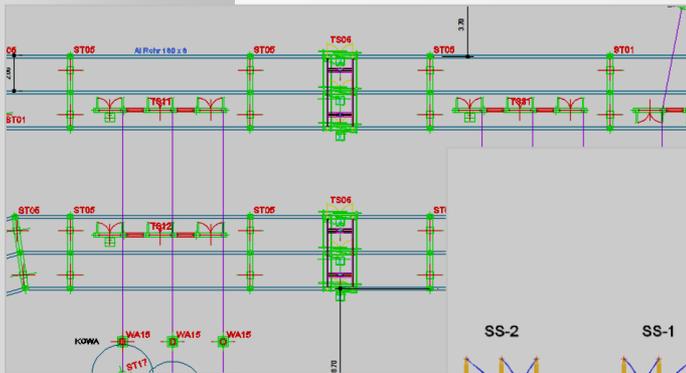
Schaltanlagen Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS



Platzbedarf Abmessungen, Grundfläche, Volumen

Luft ↔ SF₆ ABB-Gas

■ 110/123 kV Up = 550 kV	Feldbreite	9 ... 11 m	↔ 1,2 m	10 %
	SS-Höhe Rohr	7 m	↔ 3 m	50 %
	Feldtiefe SS...P	26 m	↔ 4 ... 5 m	20 %
■ 380/423 kV Up = 1050 kV	Feldbreite	18 m	↔ 2,2 ... 3,2 m	15 %
	SS-Höhe Rohr	12,5 m	↔ 6 m	50 %
	Feldtiefe SS...P	40 m	↔ 7 ... 8 m	20 %



Technologie im Vergleich

Schaltanlagen Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS



Platzbedarf Abmessungen, Grundfläche, Volumen

Luft ↔ SF₆ ABB-Gas

- 110/123 kV Up = 550 kV



Quelle: ABB

Technologie im Vergleich

Schaltanlagen Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS



Platzbedarf Abmessungen, Grundfläche, Volumen

Luft ↔ SF₆ ABB-Gas

- 380/423 kV Up = 1050 kV



Technologie im Vergleich

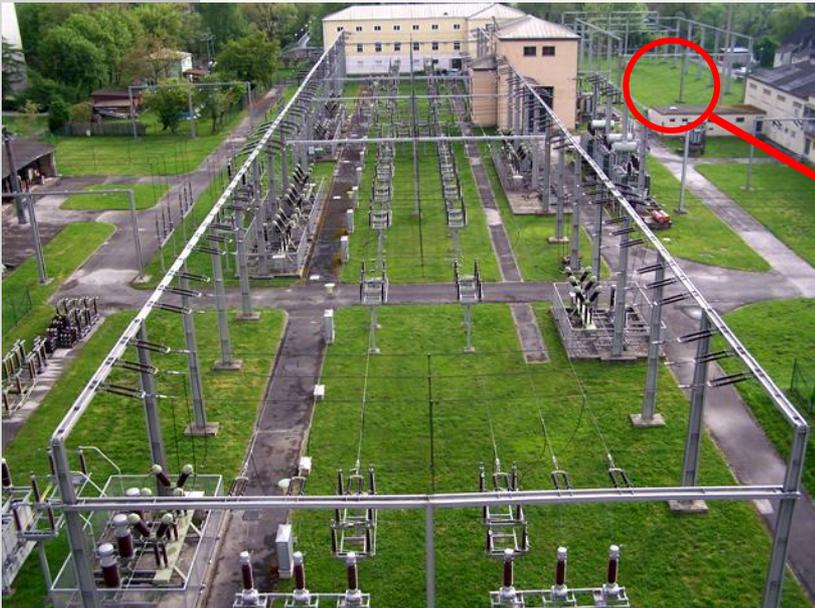
Schaltanlagen Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS



Platzbedarf Abmessungen, Grundfläche, Volumen

Stewag-Steg GmbH UW Graz Nord

- Erneuerung einer AIS-Anlage 110kV Dreifach-Sammelschiene durch eine GIS-Anlage, Dreifach-Sammelschiene 2500 A / 40 kA
9 Leitungs-Felder, 4 Umspanner-Felder, 1 Quer-Kupplung + Längs-Trenner-Feld
Anbindungen mittels 110kV VPE Kabel



Quelle: ABB



Quelle: ABB

Technologie im Vergleich

Schaltanlagen Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS



Platzbedarf Beispiele GIS 380 / 420 kV



Quelle: WN KE



Quelle: WN NO



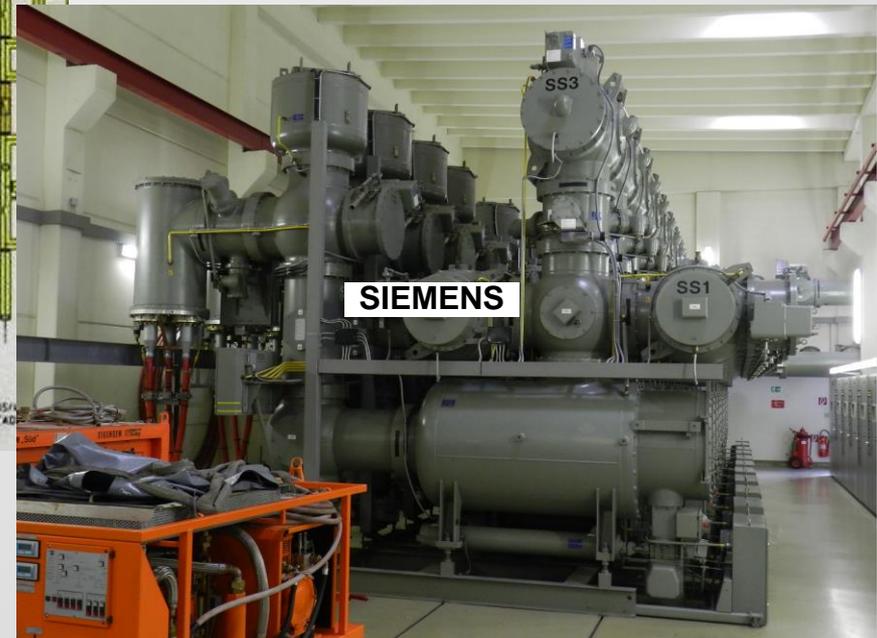
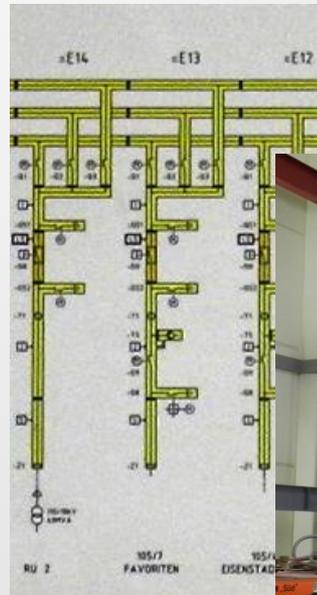
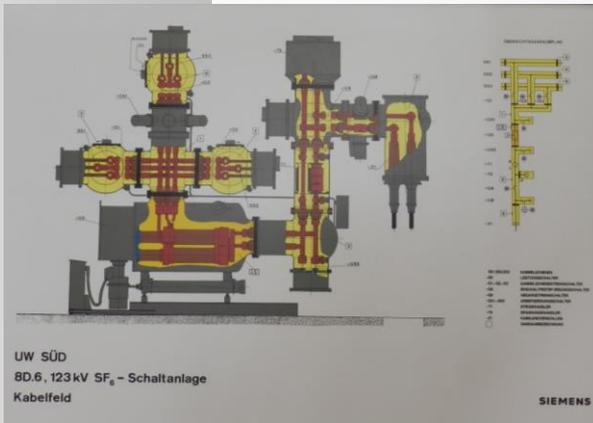
Quelle: WN SÜD

Technologie im Vergleich

Schaltanlagen Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS



Platzbedarf Beispiele GIS 110 / 123 kV



Technologie im Vergleich

Schaltanlagen Freiluft AIS ↔ SF₆-isoliert GIS



Instandhaltung Freisalten, Trennstrecken, Erdung

Luft ↔ SF₆ ABB-Gas

- Trennstrecke

direkt sichtbar

↔ nicht sichtbar, ev. Sichtfenster

↔ indirekt per Stellungsanzeige

- Erdung

Arbeitserder
Erdungsbügel +
Erdungsgarnitur

↔ Arbeitserder





Ertüchtigung, Erweiterung

Luft ↔ SF₆ ABB-Gas

- **Schnittstellen-Kompatibilität**

flexibel

produktunabhängig

↔ enge Randbedingungen

↔ produkt- / herstellerabhängig

↔ Produktstandard-Zyklen !!!

↔ Unternehmens-Zyklen !!!



Schaltanlagen im gestörten Betrieb

Luft ↔ SF₆ ABB-Gas

- **Störungsanalyse** Kompetenz ↔ Spezialist von Hersteller
WOCHEN !!
- **Störungsbehebung** div. Anbieter ↔ Hersteller, Vertragspartner
Ersatzprodukte Ersatzproduktlager ↔ KEINE Lagerhaltung
↔ Lieferzeit
MONATE !!
- **Wieder-
Inbetriebsetzung** ↔ Spannungsprüfung



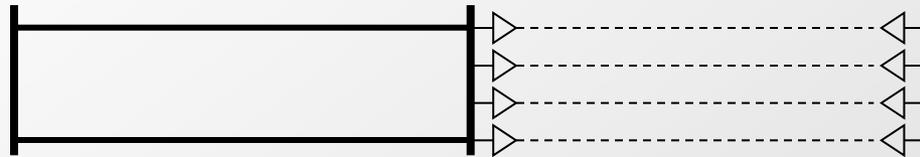
Überblick

- **Verlustleistung, Leistungsabgabe → Betriebsstrom**
- **Isoliermedien** - (dielektrische) Eigenschaften
- **Blindleistung** - Blindleistungskompensation, Erdschlussreststrom
- **Errichtung** - Trassenanforderungen
- **Ertüchtigung**
- **Gestörter Betrieb** - Störungsortung, Störungsbehebung



Verlustleistung, Leistungsabgabe → Betriebsstrom

am Beispiel **Studie Teilverkabelung** Prof. Brakelmann Duisburg / Essen



▪ Freileitung

Doppelsystem

3er-Bündelleiter 679-AL1/86-ST1A

Strombelastbarkeit

1 System 3 x 1150 A = 3450 A

im Störfall 6 x 1150 A = **6900 A**

im Normalbetrieb 60% → 4140 A

▪ Kabel

Vierfachsystem

(N)2XS(FL)2Y 1x2500 RMS/400

Strombelastbarkeit

1 System 1 x 1450 A = 1450 A

m = 0,9

4 Systeme 4 x 1450 A = **5800 A**

3 Systeme 4 x 1450 A = 4350 A



Verlustleistung, Leistungsabgabe → Betriebsstrom

Leistungsbilanz

▪ Freileitung

Seilleiter 679-AL1/86-ST1A

Strombelastbarkeit 1150 A / 80 °C bei 35 °C 0,6 m/s
gemäß Webs-Modell

Input

Joule'sche Verluste	78,2 W/m	
Sonneneinstrahlung	16,6 W/m	→ 94,8 W/m

Output

Strahlung	29,0 W/m	(5,7 W/m ² K)	
Konvektion bei 0,6 m/s	65,8 W/m	(12,9 W/m ² K)	→ 94,8 W/m

▪ Doppelsystem

3er-Bündelleiter 679-AL1/86-ST1A

Strombelastbarkeit 2 x 3450 A Stromverdrängung nicht berücksichtigt



Technologie im Vergleich

T&D Freileitung ↔ Erdkabel

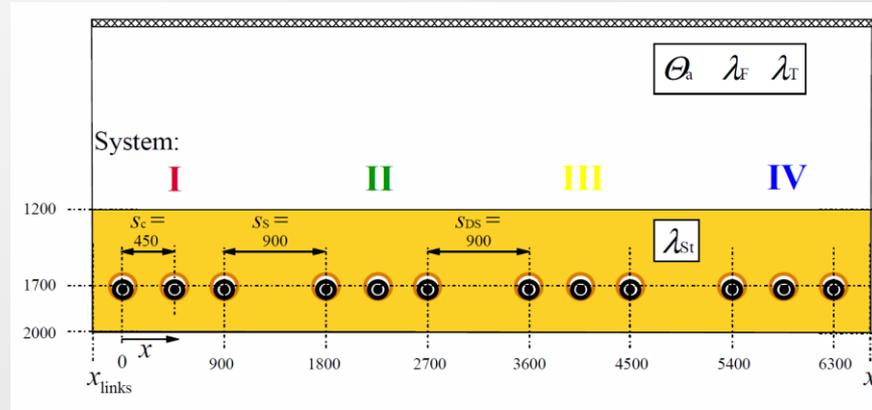


Verlustleistung, Leistungsabgabe → Betriebsstrom

Leistungsbilanz

- Kabel** (N)2XS(FL)2Y 1x2500 RMS/400
Verlegung in Rohr Boden 20 °C 1 W/Km feucht / 35 °C 0,4 W/K trocken

Schirm
 einseitig geerdet
 oder
 Cross bonding



Quelle: Brakelmann



Strombelastbarkeit ~1450 A / 90 °C m = 0,9

Strombelastbarkeit ~1300 A / 90 °C m = 1,0

4er-System

Strombelastbarkeit 5800 A m = 0,9

Strombelastbarkeit 5200 A m = 1,0

(1,1 W/m²K)



Verlustleistung, Leistungsabgabe → Betriebsstrom

Leistungsabgabe
von Kabeln signifikant niedriger als von Freileitungen

$$P_{ab} = A_{Aust} \cdot (\alpha_R + \alpha_K) \cdot \Delta\vartheta$$

- Freileitung

$$\begin{array}{l} A_{Aust} \nearrow \\ (\alpha_R + \alpha_K) \uparrow \\ \Delta\vartheta \Rightarrow \end{array}$$

- Kabel

$$\begin{array}{l} P_{ab\ K} \ll P_{ab\ F} \text{ weil} \\ A_{Aust} \nearrow \\ \alpha_{th} \downarrow \\ \Delta\vartheta \Rightarrow \end{array}$$



Isoliermedium - (dielektrische) Eigenschaften

- **Kabel**
 - ähnlich wie bei GIS
 - hochrein
 - feuchtigkeitsempfindlich
 - Undichtheiten Mantel / Schirm → Watertreeing → TE → Durchschlag
 - querwasserdichter Kabelschirm → Bleimantel, geschweißter Al-Mantel
 - Längswasserdichtigkeit – Quellvlies
 - Blitzstromtragfähigkeit von Schirm → punktuelleres Durchbrennen

- **Endverschlüsse, Muffen**
 - korrekte Ausführung der Feldsteuerung



Blindleistung - Blindleistungskompensation

▪ Freileitungen

WENN T&D-Leistung unterhalb der natürlichen Leistung
 $P < P_{\text{nat}} \rightarrow Q_{\text{kap}} > Q_{\text{ind}} \rightarrow$ Bereitstellung von Q_{ind}

Drosselgruppen in den 400 kV-Schaltanlagen
an Tertiärwicklung der Umspanner (30 kV oder 10 kV)
 $Q_{\text{ind}} = 50 \text{ MVA}$

▪ Kabel

T&D-Leistung **IMMER** unterhalb der natürlichen Leistung
Bereitstellung von Q_{ind} immer erforderlich





Blindleistung - Erdschlussreststrom

- **Freileitungen**

Erdkapazität niedrig,
Erdschlussreststrom im 110 kV-Netz < 132 A

- **Kabel**

Erdkapazität hoch,
Erdschlussreststrom im 110 kV-Netz > 132 A
Netzauftrennung erforderlich



Errichtung - Trassenanforderungen

▪ Freileitungen

- Grundflächen nur für Maste erforderlich
- Hindernisse (Verkehrswege, Täler, Gewässer, ...) können „überspannt“ werden
- Spannfeldlängen typ. 300 m
- Verbindungsstellen von Seilleitern → >> 1000 m Herstell- / Transportlänge

▪ Kabel

- Grundfläche für gesamte Trasse erforderlich
- Trassenfläche frei zugänglich, unverbaubar → öffentlicher Grund
- gelände- / einbauten-bedingte Umwege der Trassierung
- Öffnen der Terrainfläche / Grabarbeiten / offene „Baustelle“ über Trassenlänge / Wiederherstellung
- Verlegung in Rohrsystem / Einschwemmen → WATUCAB
- Herstell- / Transportlängen ~ 1000 m →
- Verbindungsstellen / Muffen → 1000 m Muffenbauwerke
- Bodenaustrocknung



Ertüchtigung

▪ Freileitungen

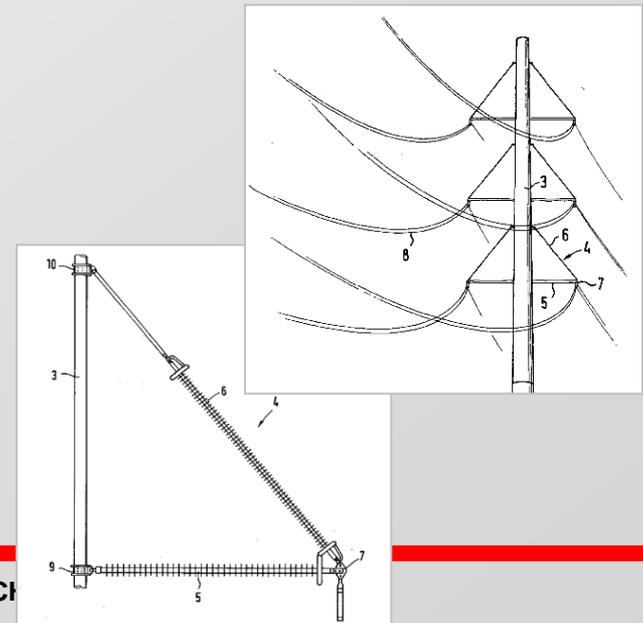
- Ersatz von Normaltemperatur-Seilleitern (80 °C) durch Hochtemperatur-Seileiter TAL (150 °C)
!!! Temperatur von Klemm- / Verbindungsstellen < 100 °C !!!
Erhöhter Durchhang →
Erhöhung der Seilaufhängung z.B. Isoliertraverse
Erhöhung von Leitungsverlusten
Vergrößerung von Leitungswinkel → Netzstabilität !!!



- Abzweige möglich

▪ Kabel

- Ertüchtigung = NEUBAU
- Punkt zu Punkt-Verbindung





Gestörter Betrieb – Störungsortung, Störungsbehebung

▪ Freileitungen

- Isolation „selbsteilend“
- Störungsortung einfach
- Störungsbehebung einfach, **rasch (Stunden ... Tage)**
keine Kollateral-Maßnahmen zur Störungsbehebung

▪ Kabel

- Kabel i.a. lokal zerstört → Ersatz / Einstücklung
- Störungsortung aufwändig, Aufgrabungen erforderlich
- Störungsbehebung aufwändig, **zeitaufwändig (Tage ... Wochen)**
 - Muffung
 - Aufgrabungen → Kollateral-Maßnahmen
 - Herstellen von Muffenbauwerk
 - Beschaffung von Kabelstück
 - Herstellen der Muffenverbindung → Spezialisten



Überblick

- **Umspanner** - Arten
- **Eisenkern und Induktion**
- **Geräusch** Schallemission **Stationärer Betrieb**
- **Geräusch** **Transienter Betrieb**
- **Geräusch**
- **Einhausung**
- **Einschaltströme**
- **Geomagnetisch induzierte Ströme**

Technologie im Vergleich

Umspanner Flüstertrafo ↔ Einhausung



Umspanner - Arten

Regel-Hauptumspanner RHU

- RHU typ. 300 MVA ... 600 MVA
- PST Phasenschiebertrafo (Querregler – P-Steuerung, Längsregler – Q-Steuerung, Schrägregler)
- typ. 200 ... 600 MVA Erregertrafo + Serientrafo

600 MVA
RHU 41
400/230/30kV



Technologie im Vergleich

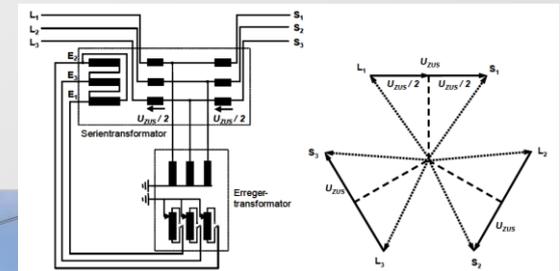
Umspanner Flüstertrafo ↔ Einhausung



Umspanner - Arten

Phasenschieber-Transformatoren PST

- Querregler – P-Steuerung, Längsregler – Q-Steuerung, Schrägregler
- 200 ... 600 MVA
- z.B. 600 MVA 400 ± 13x1,25% / 230 / 30 kV Volltrafo
- z.B. 300 MVA 232 / 232 kV ± 60 ° (±16x2x2 Stufen) Spartrafo VLI
- zweiteilig Erregertrafo + Serientrafo



Quelle: APG ACADEMY Phasenschiebertransformatoren



Quelle: SIEMENS

Technologie im Vergleich

Umspanner Flüstertrafo ↔ Einhausung



Umspanner – haben Namen

Regel-Hauptumspanner RHU

- Sarasdorf VSS

APG
ANLAGEN-PROJEKTIERUNG
GMBH

TRANSFORMATOR RHU41
WOLFGANG

Inbetriebnahme unter der Patronanz von Herrn
Dipl.-Ing. Wolfgang Haimbl.
30. Juni 2011, Sarasdorf

Promotor des Workshops





Eisenkern & Induktion

Konsequenzen

- Magnetisierungsstrom niedrig
- Hysterese- / Ummagnetisierungsverluste niedrig
- Wirbelstromverluste niedrig
- **Remanenz** hoch

→ **Geräusch**

→ **Einschaltströme**

Technologie im Vergleich

Umspanner Flüstertrafo ↔ Einhausung



Geräusch Schallemission

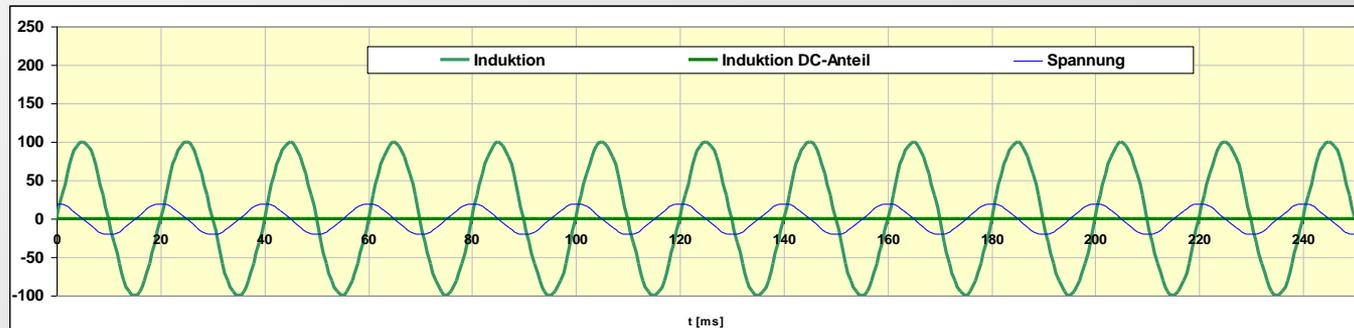
Stationärer Betrieb

Geräusch-Ursache, Geräusch-Quelle

- lastabhängig
 - im Leerlauf → Eisenkern: Magnetostriktion der Kernbleche = $f(B^\alpha)$
 - unter Last → Eisenkern: Magnetostriktion der Kernbleche + Lorentzkräfte in/auf Wicklungen, Schirmbleche, Kessel, ..
- Induktion / Flussdichte → proportional zu Windungsspannung → sinusförmiger Verlauf
- **magnetische Ausnutzung** möglichst **hoch** →
Induktion / Flussdichte knapp unter Sättigung

Geräusch-Intensität

- progressiv-proportional zu Induktion / Flussdichte



Technologie im Vergleich

Umspanner Flüstertrafo ↔ Einhausung



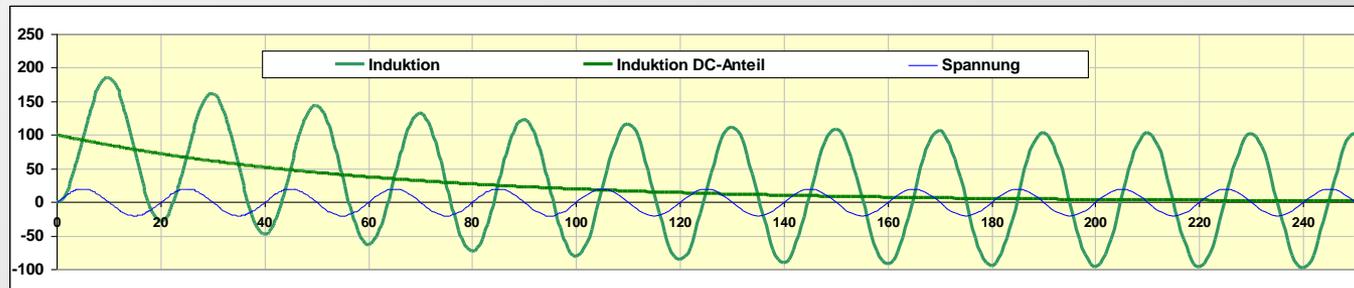
Geräusch Transienter Betrieb

Einschalten des Umspanners

- Prinzip → Einphasen-Transformator
- Energie-Erhaltungssatz → **Fluss Φ** kann sich nur stetig ändern
→ **Induktion / Flussdichte B** kann sich nur stetig ändern
→ asymmetrischer Anfangsverlauf **Abklingzeitkonstante 5 ... 15 min**
2.OW < 1% (GW)
- Asymmetrie abhängig von
 - Remanenz
 - Einschaltzeitpunkt innerhalb von Spannungs-(halb)-welle
- Ungünstigster Einschaltzeitpunkt
 - ~ **Spannungsnulldurchgang** → maximale Asymmetrie

OHNE / MIT Remanenz

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{L} \cdot (N\Phi)^2$$





Geräusch

Limits

- bewerteter Schallpegel im 1 m Horizontalabstand unter Berücksichtigung von Grundsollpegel
 - **im Leerlauf** **80 dB(A)**
 - unter Last 82 ... 83 dB(A)

Gegenmaßnahmen

- Aktive Maßnahmen - Ursachenbekämpfung → limitiert
 - **Induktion / Flusssdichte** **reduzieren ?**
 - **Magnetostriktion** **reduzieren ?**
- Reaktive Maßnahmen - Symptombekämpfung intern
 - **Akustische Entkopplung** von Eisenkern und Kessel → wenig wirkungsvoll, weil Körperschallübertragung überwiegend via Öl (temperaturabhängig)
 - **Klassische Schalldämmungsmaßnahmen** im Kessel / am Kessel → nicht umsetzbar
Platzbedarf, dielektrische Eigenschaften, Lebensdauer, Brandlast, thermische Isolierung, ...
 - **Vermeidung von Resonanz**
- Passive Maßnahmen - Symptombekämpfung extern
 - **Lärmschutz-Wände**
 - **Lärmschutz-Einhausungen**

Technologie im Vergleich Umspanner Flüstertrafo ↔ Einhausung



Einhausung



Technologie im Vergleich

Umspanner Flüstertrafo ↔ Einhausung



Einhausung



Technologie im Vergleich

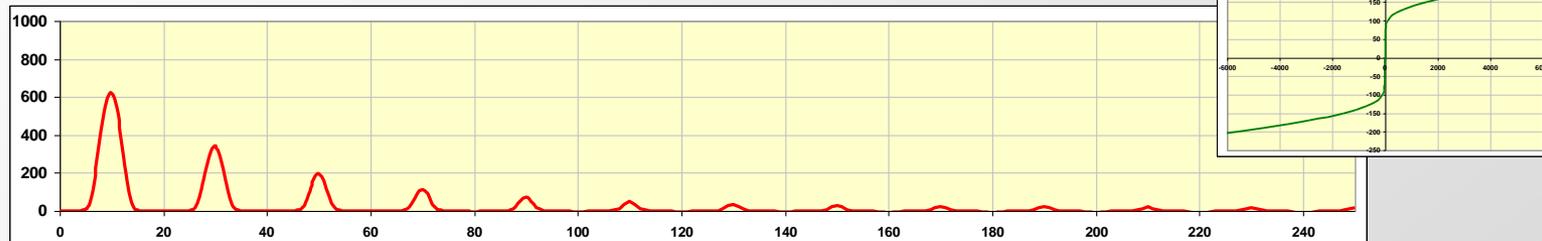
Umspanner Flüstertrafo ↔ Einhausung



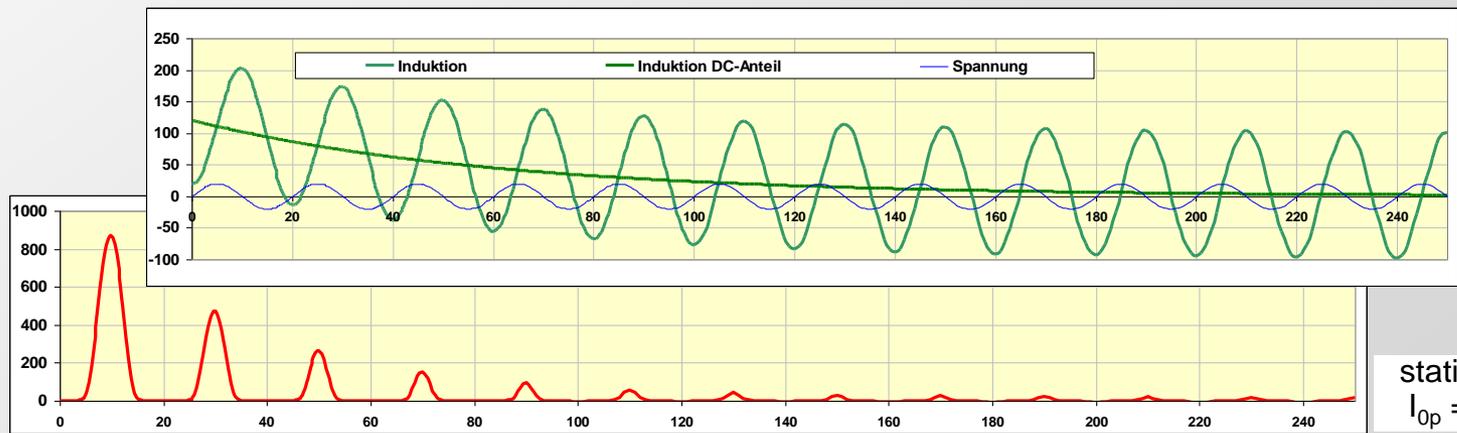
Einschaltströme

Magnetisierungsstrom

- Einschaltstrom zu asymmetrischer Anfangsverlauf von B **OHNE Remanenz**



- Einschaltstrom zu asymmetrischer Anfangsverlauf von B **MIT 20 % Remanenz**

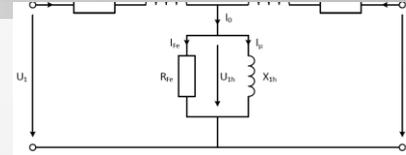


Technologie im Vergleich

Umspanner Flüstertrafo ↔ Einhausung



Einschaltströme

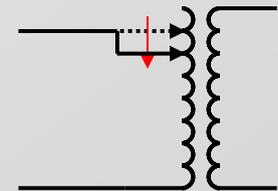
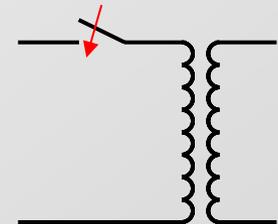


Magnetisierungsstrom → Wirkungen

- zufolge von Sättigung überproportional hoch → Kurzschlussstrom
- elektrodynamische Beanspruchung der Wicklung
- thermische Beanspruchung der Wicklung
- Intensivierung von Geräusch zufolge der Lorentz-Kräfte

Anlässe für Einschaltströme

- Einschalten eines Transformators (Stammwicklung + opt. Wicklungen)
- Umschaltungen der Regelwicklung mit dem Transformatorstufenschalter i.A OS-seitig

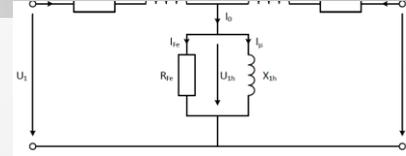


Technologie im Vergleich

Umspanner Flüstertrafo ↔ Einhausung

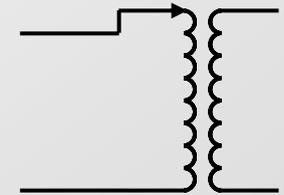


Einschaltströme



Verringerung von Einschaltströmen

- OS-seitige Einschaltung (Stammwicklung + Regelwicklung) → Stellung des Transformatorstufenschalters auf **höchste Spannungsstufe** der Regelwicklung
- Einschaltung ohne Regelwicklung → via **Wicklung mit der höheren bez. Streuimpedanz X_{σ}** i.A äußerste Zylinderspulenwicklung
- **Point on wave controlled switching** mit Hilfe einpoliger Leistungsschalter



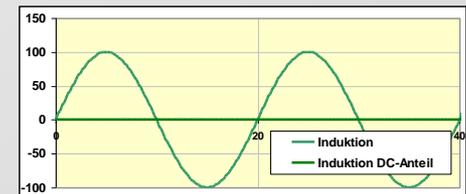


Geomagnetisch induzierte Ströme geomagnetic induced currents GIC

Modell

- Koronale Massenauswürfe der Sonne → intensive hochfrequente Strahlung + hochenergetische Partikel → Anstieg der elektromagnetischen Strahlung (Sonnensturm)
- Schwächung von Erdmagnetfeld
- Induktion extrem niederfrequenter Spannungen → ~DC-Ströme hauptsächlich in hohen Breiten
- Radiologischer Sturm erreicht Erde nach typ. 10 min
- Schockfront erreicht Erde nach 18 ...36 Stunden

Gefährdungsdossier Sonnensturm
Bundesamt für Bevölkerungsschutz CH, 30. Juni 2015

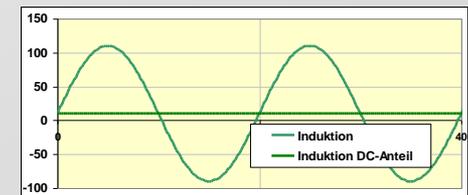




Geomagnetisch induzierte Ströme geomagnetic induced currents GIC

Wahrnehmungen, Wirkungen

- ~DC-Ströme als Nullströme, Größenordnung 100 mA ... einige A, vor allem im niederohmigen Hochspannungsnetz
- Verschiebung des magnetischen Arbeitspunktes von Transformatoren
~DC-Offset der Induktion / Flussdichte →
- magnetische Sättigung →
erhöhter Magnetisierungsstrom mit DC-Anteil →
DC-Anteil führt zu magnetischem Offset klassischer Stromwandler
DC-Anteil wird von klassischem Stromwandler nicht übertragen
- Geräuschintensivierung





Danke für Ihr / Euer Interesse

Hansjörg Hauer

IC.Hauer@aon.at