

# Einsatz eines supraleitenden Strombegrenzers aus Sicht eines Verteilnetzbetreibers

- Gemeinschaftsstudie -

René Steinhorst, TEN Thüringer Energienetze GmbH & Co. KG

ZIEHL VIII, Berlin 4., 5. April 2022

**avacon**



**NETZE**  
Magdeburg

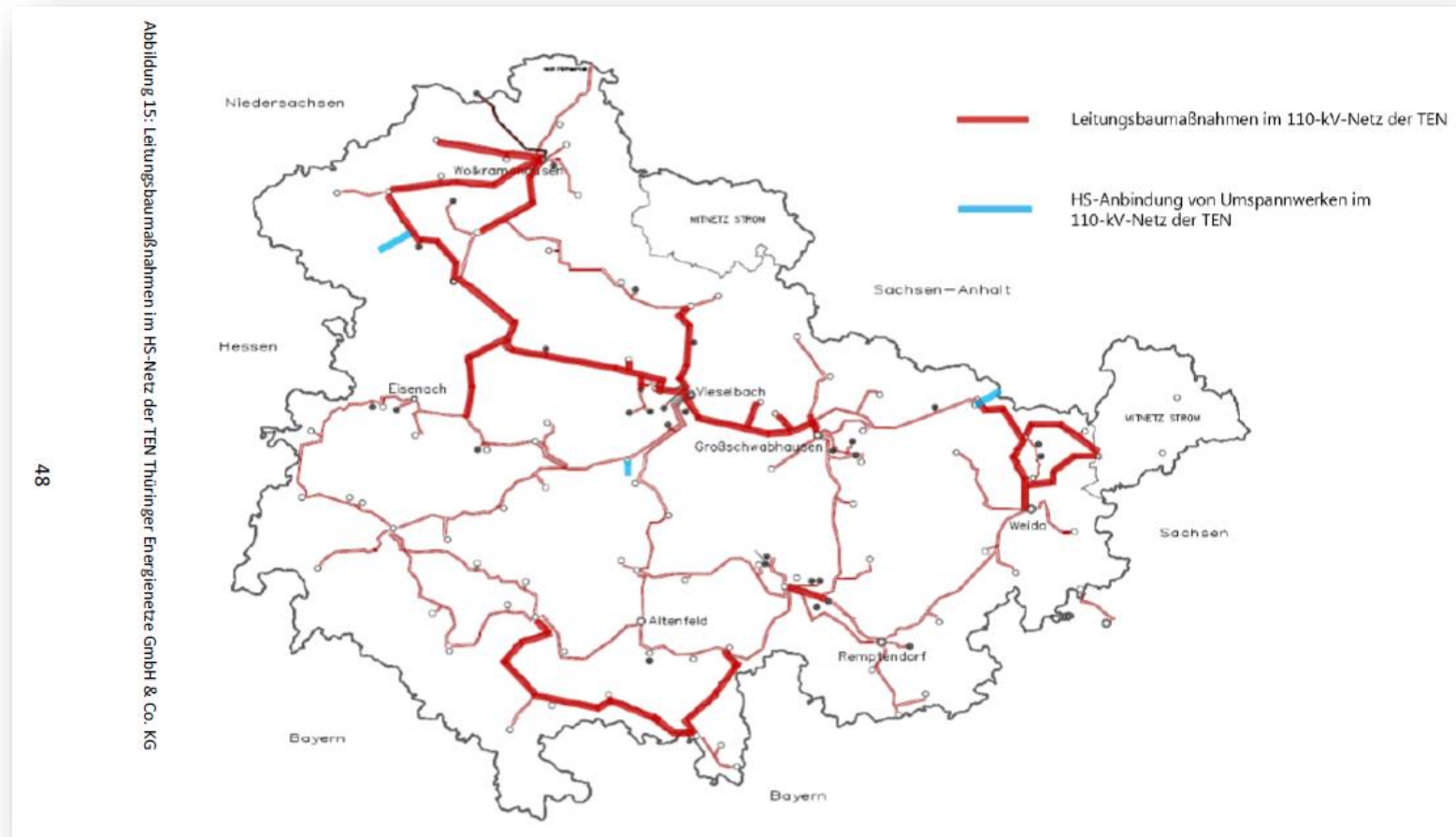


**e.dis**



# Netzausbauplan (NAP) – ARGE FNB OST

- Prognose und Regionalisierung der erneuerbaren Energien
- Zunahme der Rückspeiseleistung zum ÜNB
- Notieren der technisch-wirtschaftlich günstigsten Netzausbaumaßnahmen
- Welche Auswirkungen ergeben sich auf Fehlerströme ( $I_k''$ ) mit entsprechenden mechanischen und thermischen Belastungen von Betriebsmitteln?

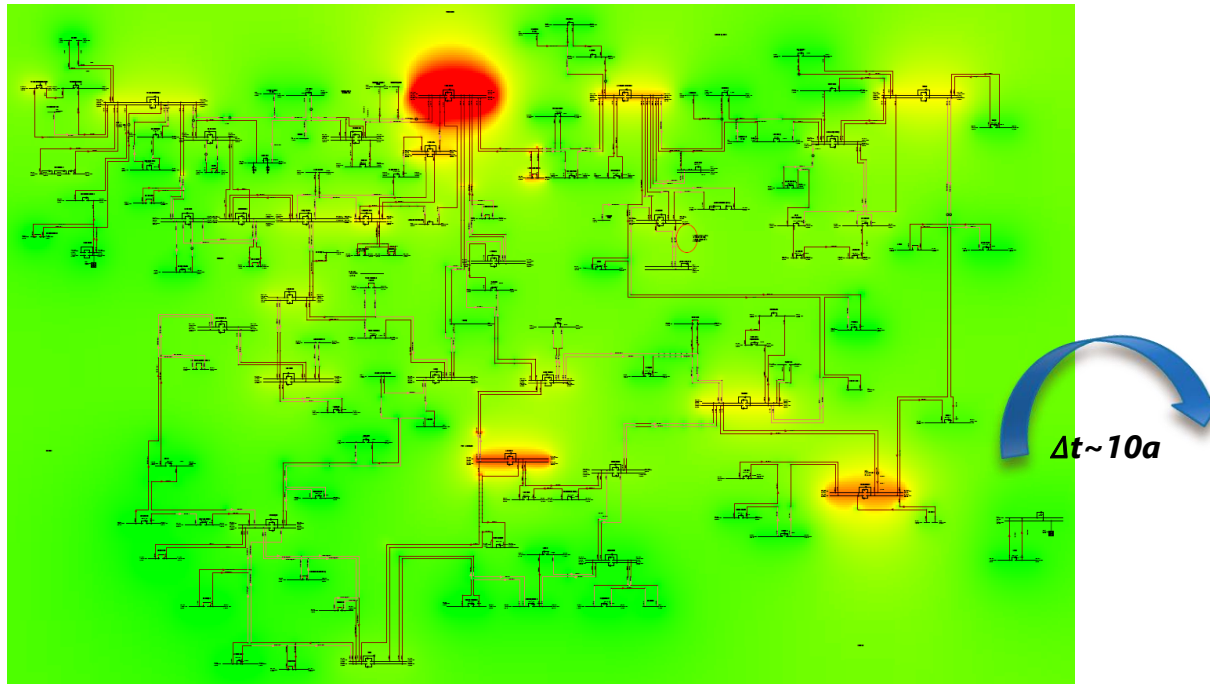


Auszug aus dem NAP:

<https://www.arge-fnb-ost.de/arbeitsfelder/netzausbauplan>

# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz

**zunehmender Bedarf an Kurzschlussstrombegrenzungsmaßnahmen**



$I_{k3}''$  SINICAL-HS 2020 Schematisch

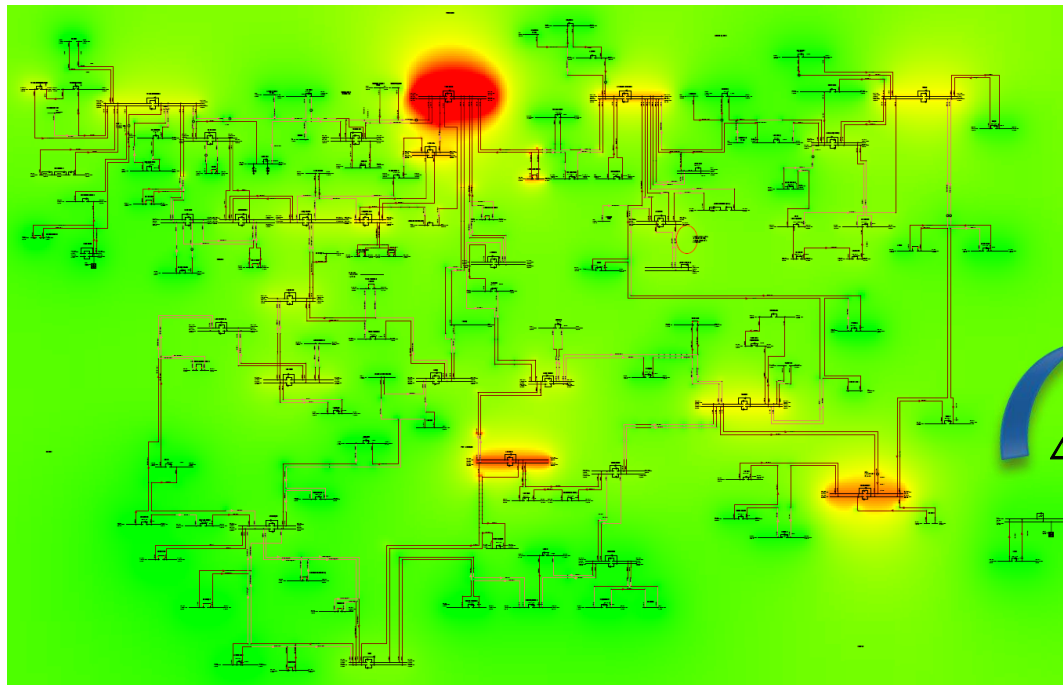
**ISO-Fläche - Kurzschluss:  $I_{k3}''$**

- 10,0 kA
- 25,0 kA
- 31,5 kA

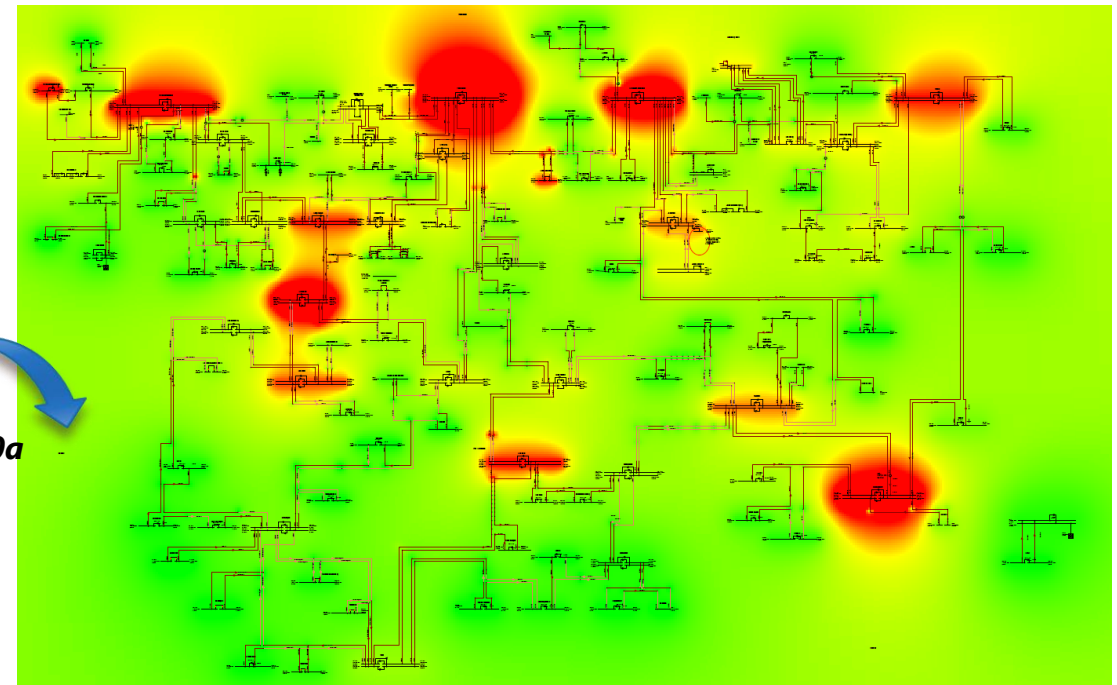
Hinweis: rote Flächen  $\neq$  Überschreitung der  $I_{k3}''$ -Festigkeit eines Umspannwerkes

# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz

**zunehmender Bedarf an Kurzschlussstrombegrenzungsmaßnahmen**



$I_{k3}''$  SINCAL-HS 2020 Schematisch



$I_{k3}''$  SINCAL-HS 2030 Schematisch

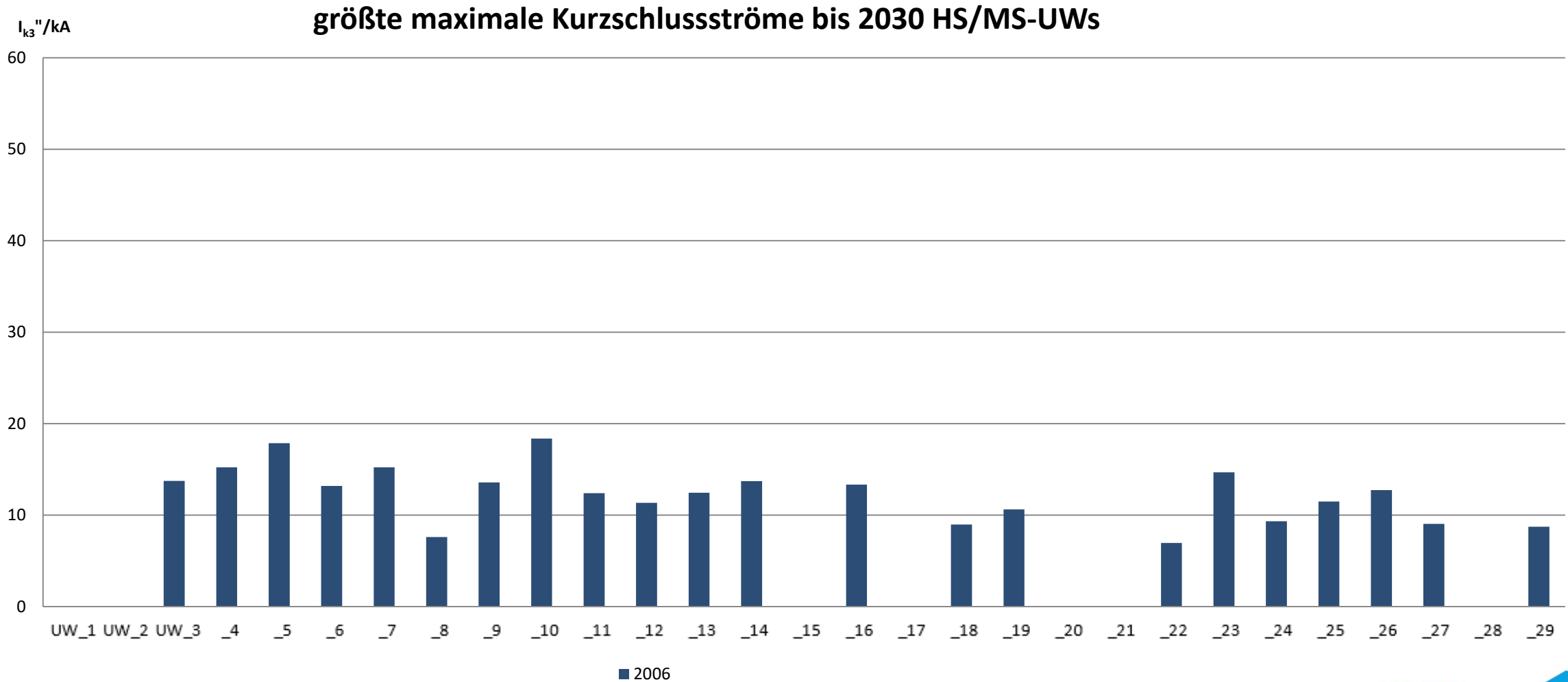
$\Delta t \sim 10a$

**ISO-Fläche - Kurzschluss:  $I_{k3}''$**

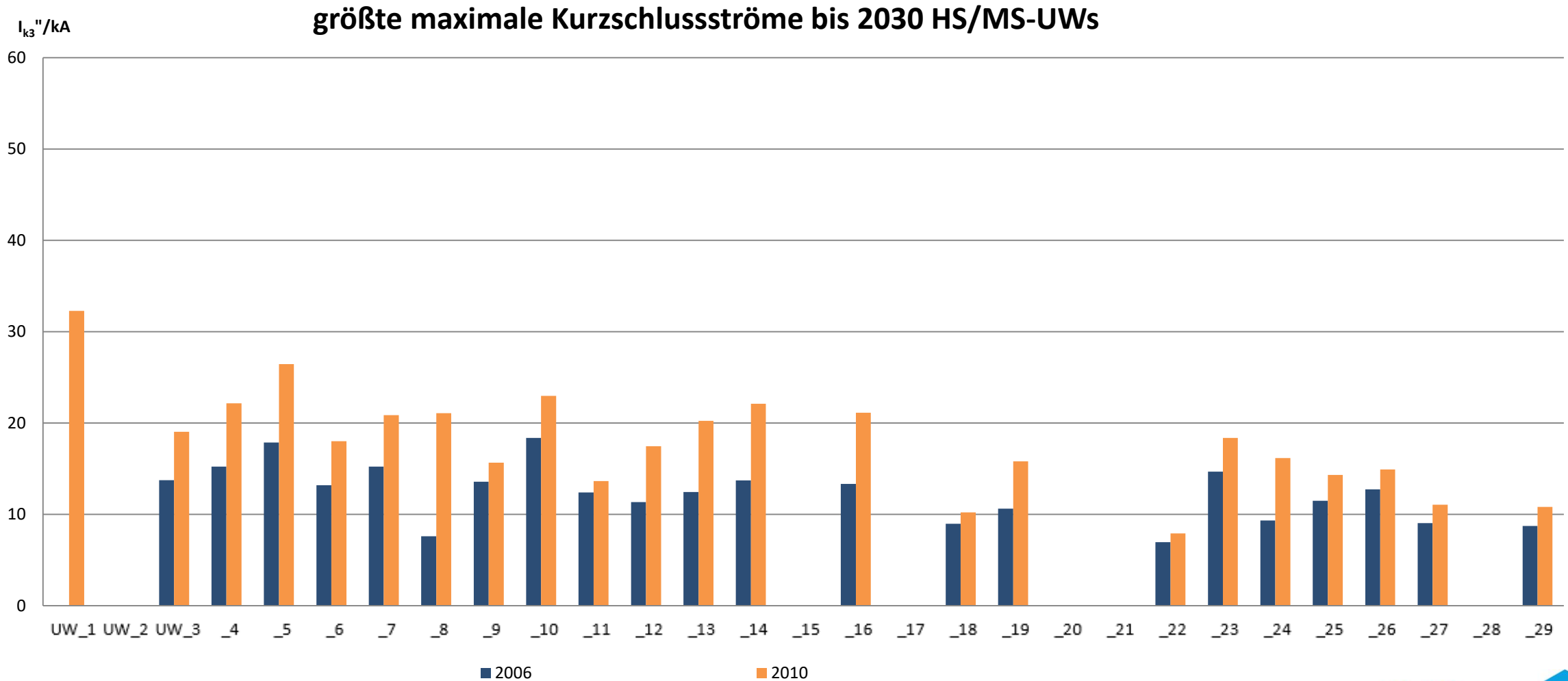
- 10,0 kA
- 25,0 kA
- 31,5 kA

Hinweis: rote Flächen  $\neq$  Überschreitung der  $I_{k3}''$ -Festigkeit eines Umspannwerkes

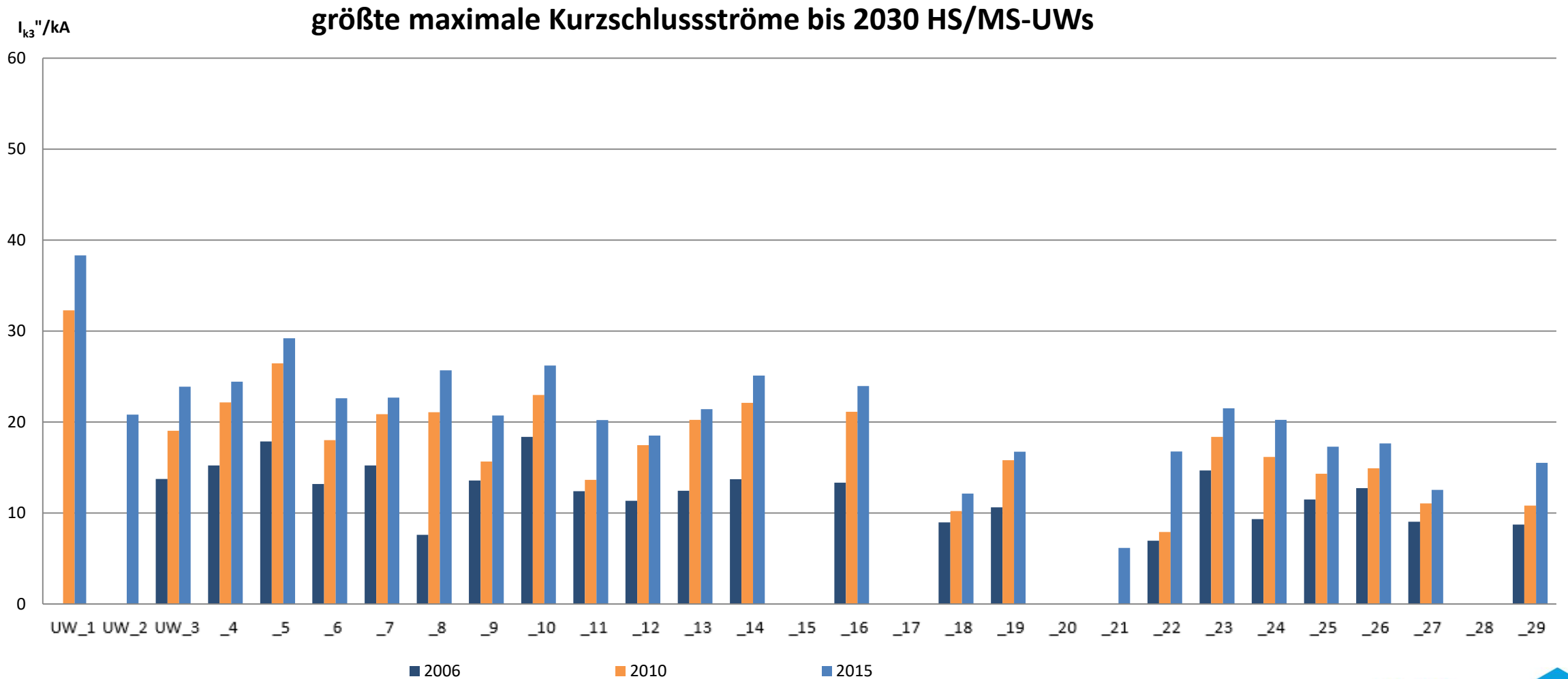
# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz



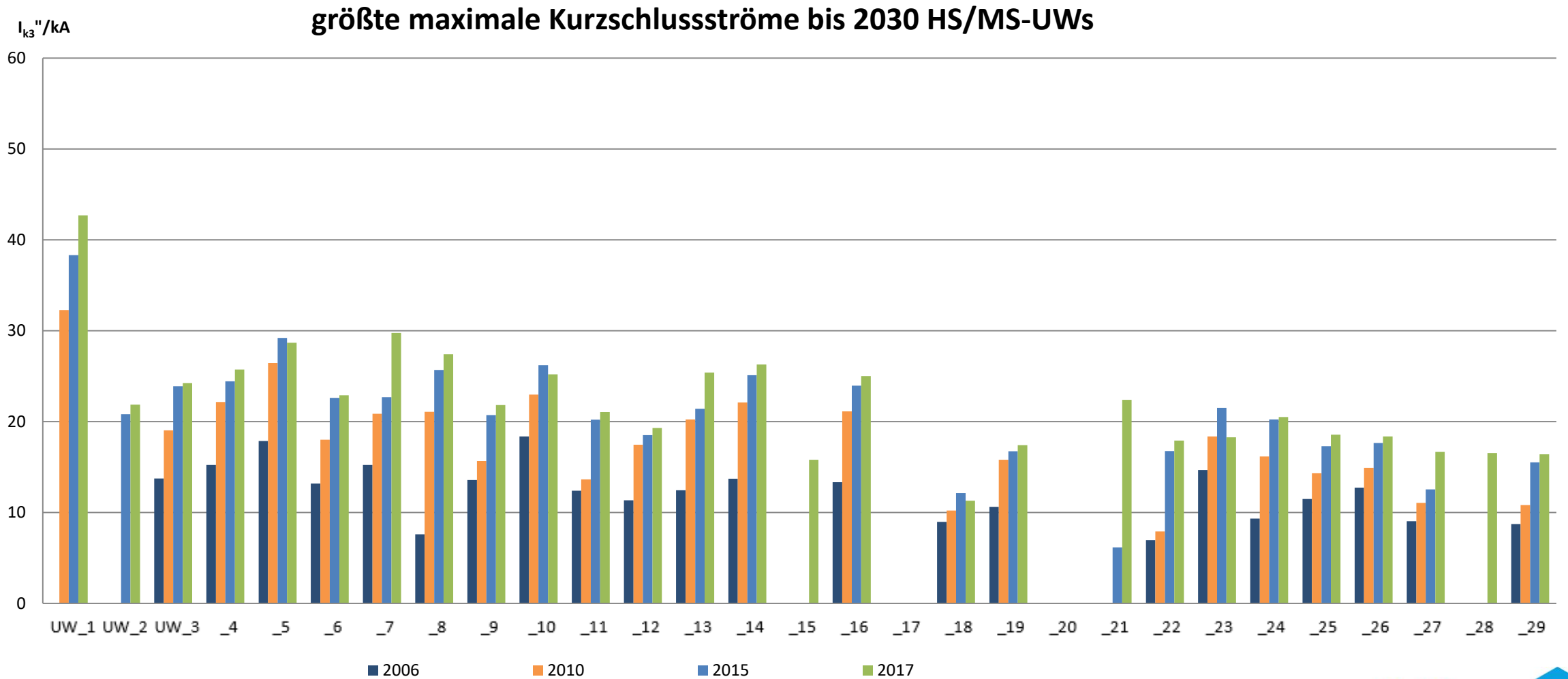
# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz



# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz

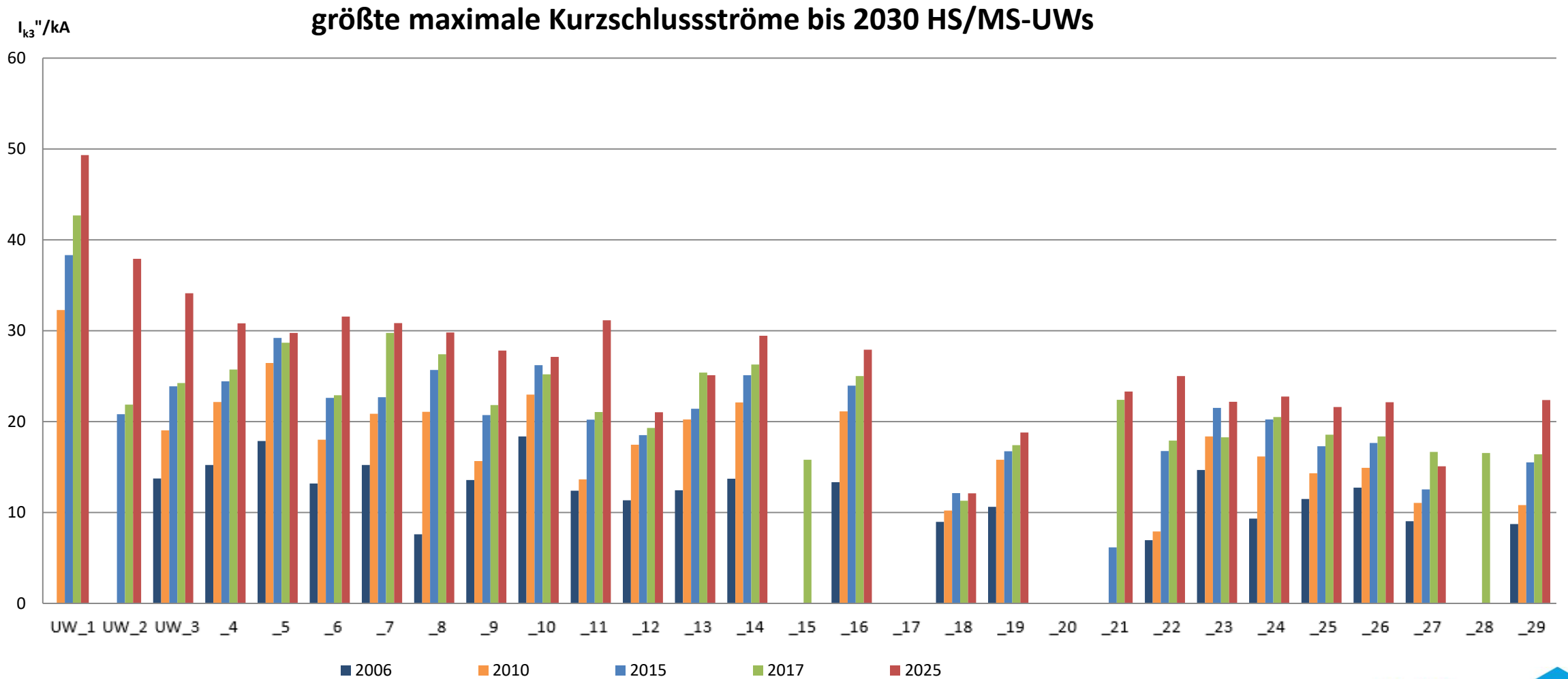


# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz



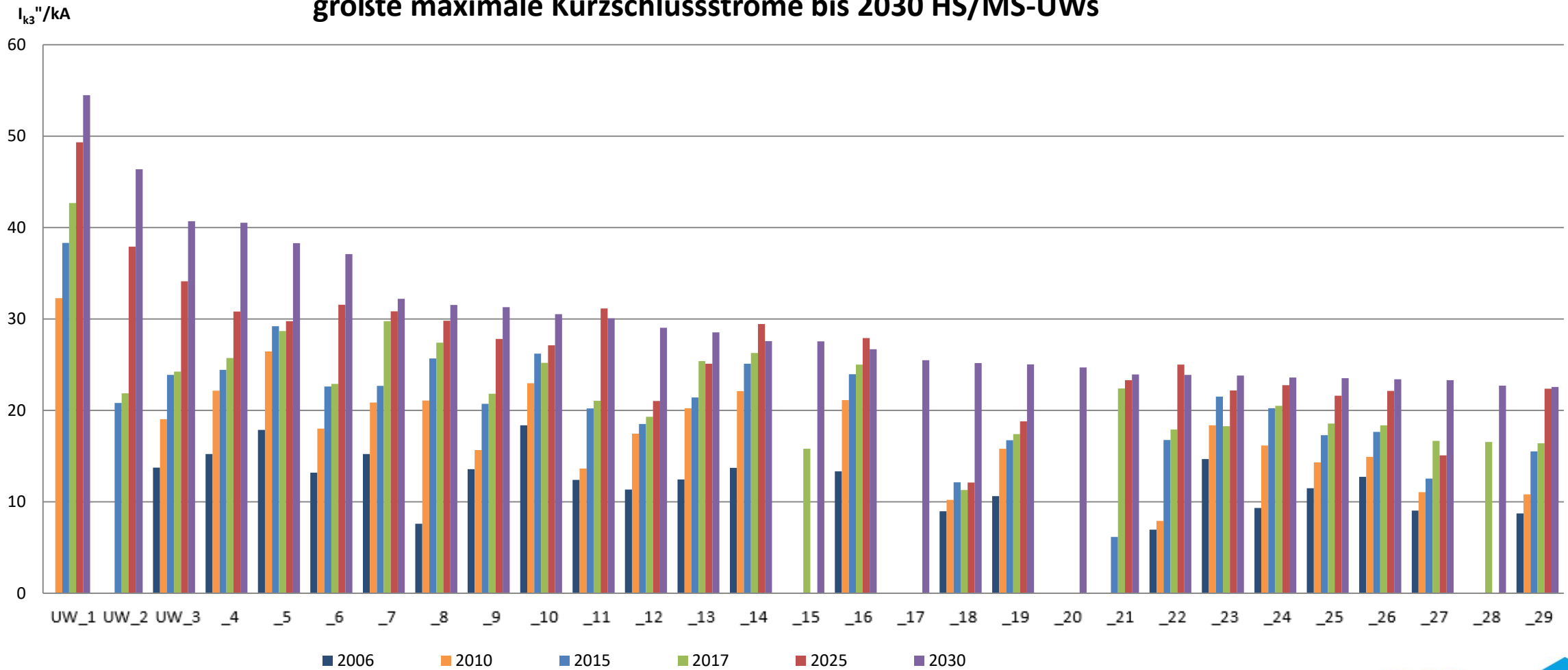


# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz

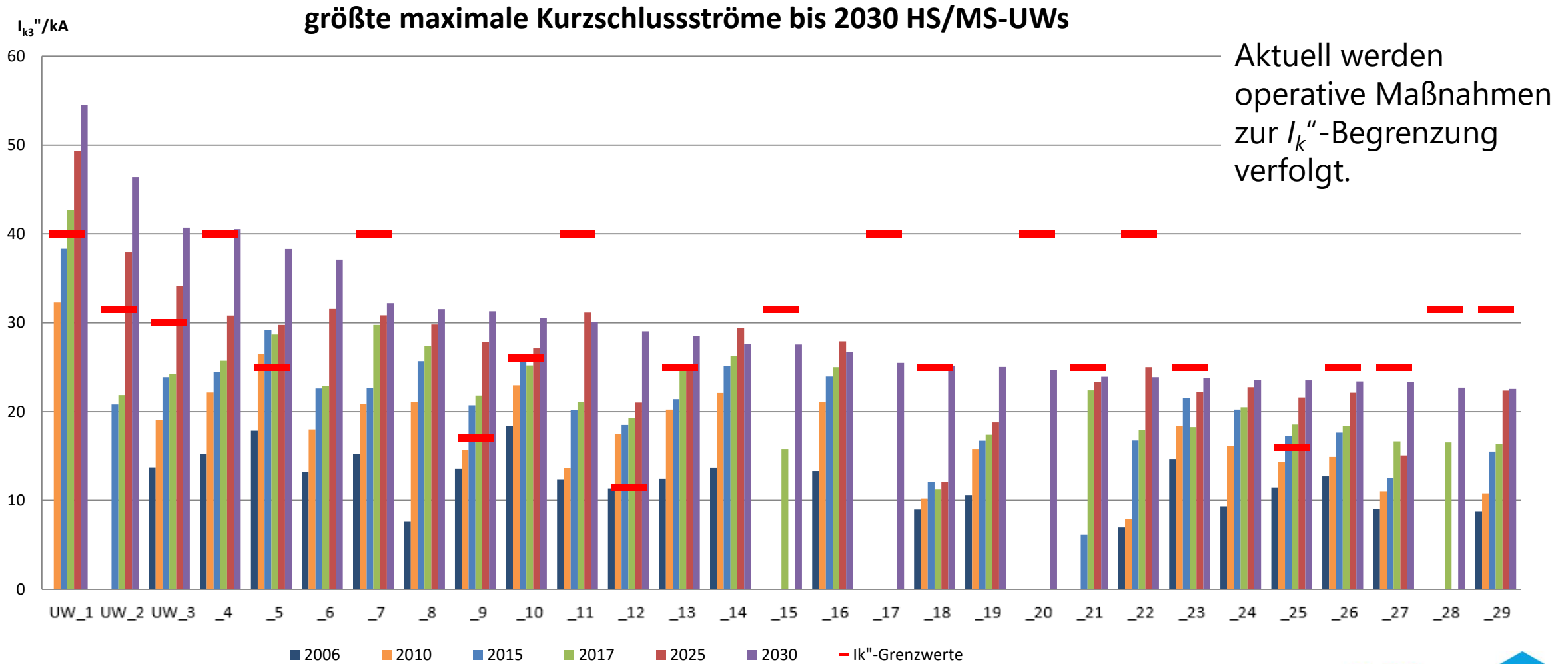


# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz

größte maximale Kurzschlussströme bis 2030 HS/MS-UWs

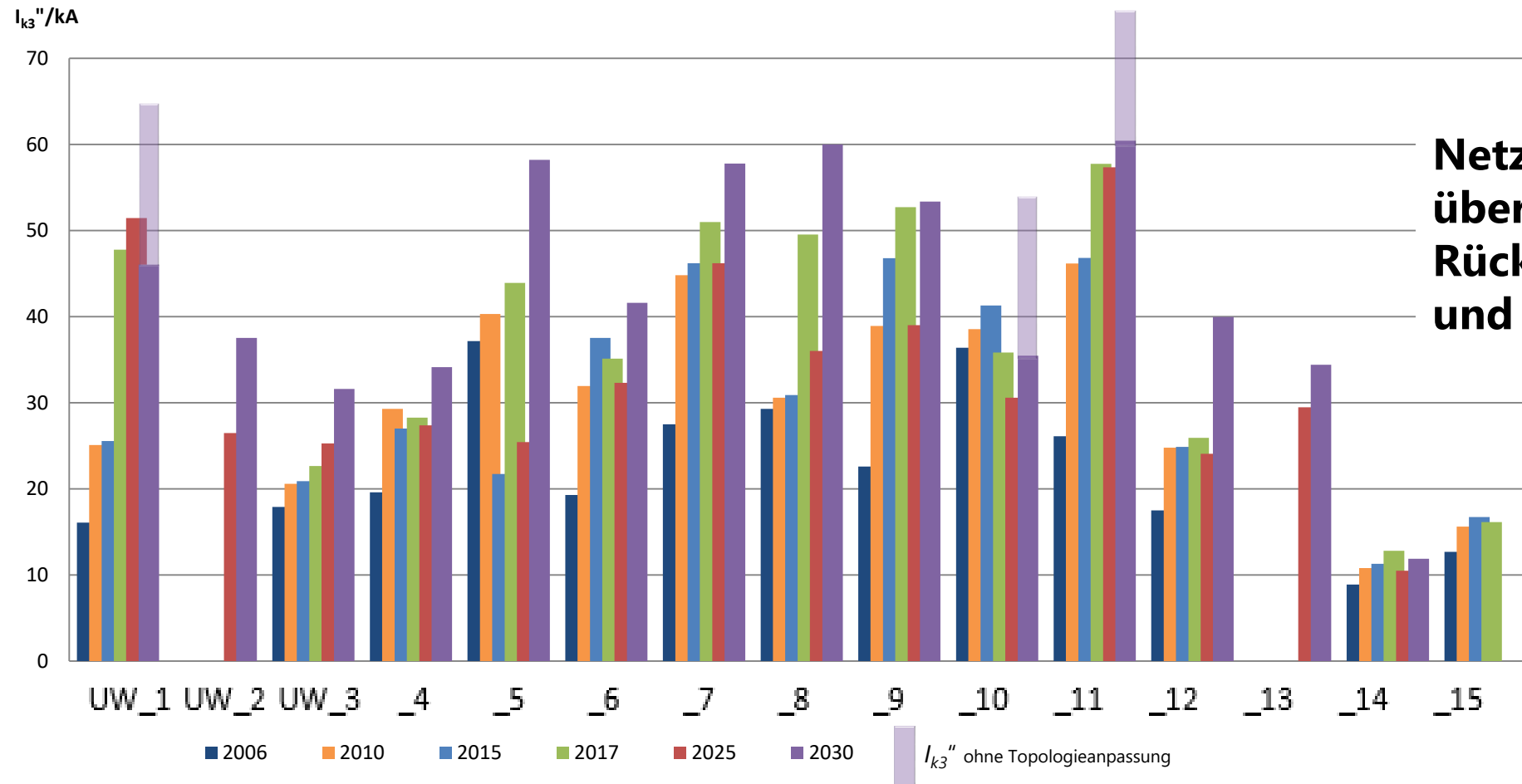


# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz



# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im HöS-Netz der 50HzT

Entwicklung  $I_k''_{max}$  HöS/HS-UWs



**Netzausbau  
überkompensiert  
Rückbau von Kern-  
und Kohlekraftwerken**

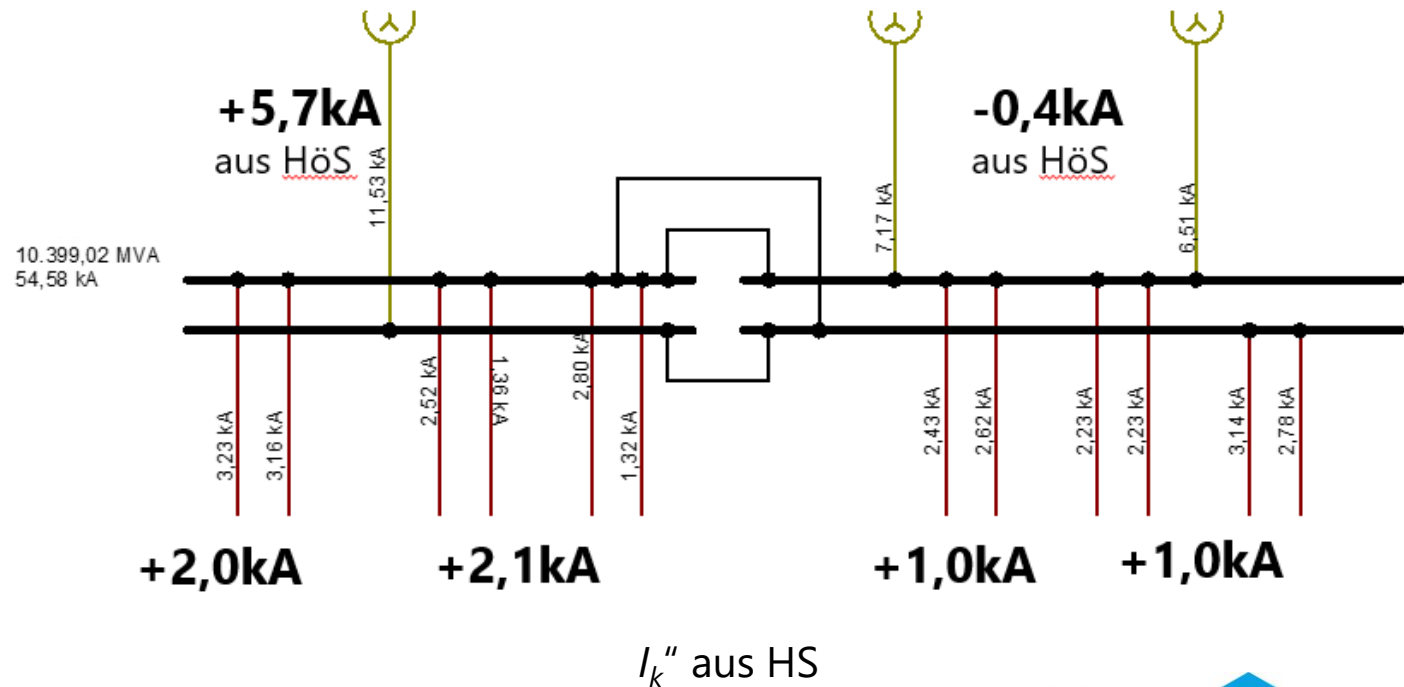
# Fallbetrachtung eines ausgewählten Umspannwerkes

## Prognose ins Jahr 2030 (und Vergleich zu 2020)

- maximaler Kurzschlussstrom:  $I_{k3}''_{2030} = 54,6 \text{ kA}$
- Zusammensetzung der  $I_k''$ -Beiträge:
 

|       |               |
|-------|---------------|
| HKW:  | 4,0 kA (+0,1) |
| Wind: | 5,2 kA (+0,7) |
| PV:   | 2,4 kA (+1,1) |

**Fazit:** Der Treiber der zunehmenden Fehlerströme ist der Netzausbau, insbesondere die zunehmende Transformatorenleistung zwischen HöS und HS. Der Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen spielt hierbei eine nachgelagerte Rolle.



# Konglomerat an potentiellen Abhilfemaßnahmen

| Maßnahme   | Bemerkungen  |
|--|--|
| galvanische Netztrennung                         | schnelle Lösung, Einschränkungen in Netzführung, langfristig: Netzverstärkung mglw. nötig    |
| Verstärkung Primäranlage                         | begrenzte Möglichkeiten  |
| UW – Neubau                                      | Preisintensiv, abschreibungsbedingt kaum zu realisieren                                      |
| Kurzschlussstrombegrenzungsdröseln               | auch kompensierbar   |
| Installation anderer Großtransformatoren         | kleinere $S_n$ , größere $u_k \rightarrow$ geringe Wirkung                                   |
| Gleichstromkurzkupplung                          | $I_{k3}'' \approx I_n$ , Leistungsaustausch gesteuert möglich (P & Q voneinander unabhängig) |
| Supraleitende Kurzschlussstrombegrenzer          | <b>nicht nur MS geeignet!</b>  |
| Is-Begrenzer                                     | nur MS geeignet  |
| PROLIM   | nur MS geeignet  |
| Hybrider Leistungselektronmischer Strombegrenzer | nur MS geeignet  |
| Flüssigmetallstrombegrenzer                      | nur NS geeignet  |

# Anforderungen an einen idealen Strombegrenzer

**Eigenschaften, Einsatzort, Fehlerverlauf**

# Anforderungen an einen idealen Strombegrenzer

|  | - <b>Günstige Anschaffung</b>         |  |
|--|---------------------------------------|--|
|  | - <b>robust, bewährt, wartungsarm</b> | - <b>geringste Impedanz dieses Zweigelementes:</b>         |
|  |                                       | - <b>kein Spannungsfall</b>                                |
|  |                                       | - <b>keine Verschiebung des Leistungsflusses</b>           |
|  |                                       | - <b>geringe Wirkleistungsverluste</b>                     |
|  |                                       | - <b>Zukunftssicherheit</b>                                |
|  |                                       | - <b>Wirtschaftlichkeit</b>                                |
|  |                                       | - <b>uneingeschränkte Flexibilität für Betriebsführung</b> |
|  |                                       | - <b>hohe Spannungsqualität</b>                            |
|  |                                       |  |
|  |                                       |  |
|  |                                       |  |



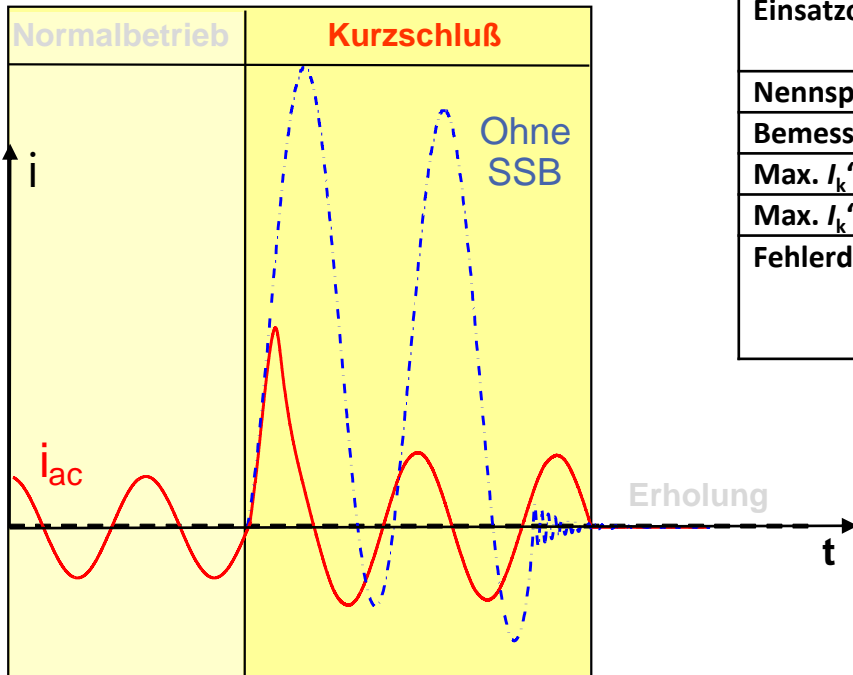
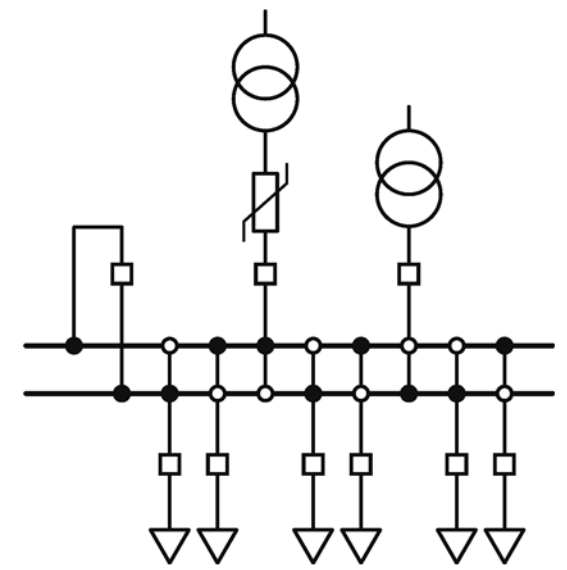
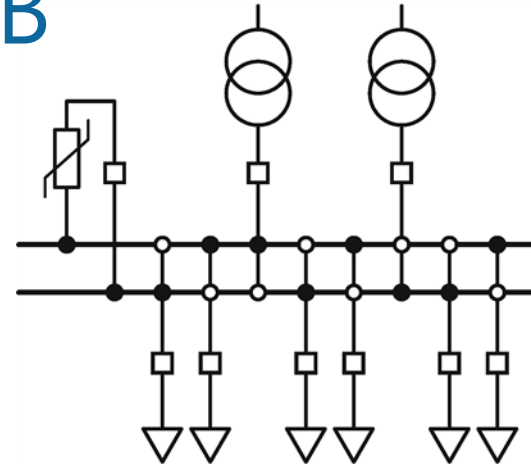
# Drossel

# <-> supraleitender Strombegrenzer

|                  | Kurzschlussstrombegrenzungsdrossel   | S-FCL   |
|------------------|--|---|
| <b>Vorteile</b>  | - Günstige Anschaffung   | - Q-Kompensation entfällt                           |
|                  | - robust, bewährt, wartungsarm   | - geringste Impedanz dieses Zweigelementes:         |
|                  |  | - kein Spannungsfall                                |
|                  |  | - keine Verschiebung des Leistungsflusses           |
|                  |  | - geringe Wirkleistungsverluste                     |
|                  |  | - Zukunftssicherheit: da feste $I_k$ -Obergrenze    |
|                  |  | - Wirtschaftlichkeit                                |
|                  |  | - uneingeschränkte Flexibilität für Betriebsführung |
| <b>Nachteile</b> | - Q-Kompensation notwendig   | - erhöhte Anschaffungskosten                        |
|                  | - Spannungsfall (Last- und Erzeugungsszenario)   |   |
|                  | - Verschiebung des Leistungsflusses im vermaschten Netz<br>(beeinflusst Netzausbaubedarfe) |   |
|                  | - Zus. Wirkleistungsverluste   |   |

# Anforderungen an den SSB

Es wurden gemeinsam universelle Spezifikationen eines potentiellen SSB erkundet.

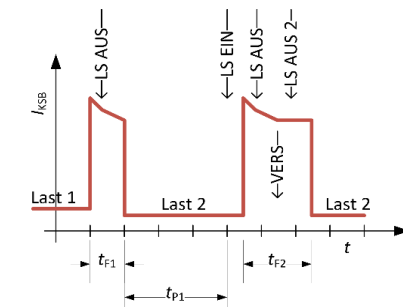
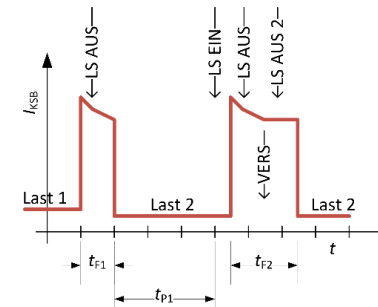
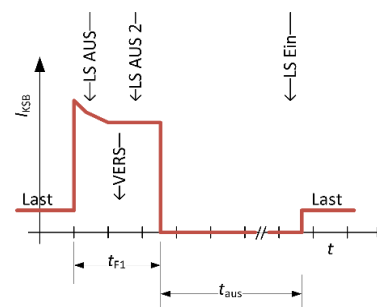


| Einsatzort                    | Sammelschienenkupplung |   | Transformatoreneinspeisung                                  |
|-------------------------------|------------------------|---|---|
|                               | A<br>Kupplung öffnen   | B<br>Fault ride through                                     | C<br>Fault ride through                                     |
| Nennspannung $U_n$            | 110 kV                 | 110 kV  | 110 kV  |
| Bemessungsstrom $I_r$         | 3,15 kA                | 3,15 kA   | 2,1 kA  |
| Max. $I_k''$ (ohne Begrenzer) | 50 kA                  | 50 kA   | 13 kA   |
| Max. $I_k''$ (mit Begrenzer)  | 6,5 kA                 | 6,5 kA  | 4,5 kA  |
| Fehlerdauer                   | $t_{F1} = 0,25$ s      | $t_{F1} = 0,10$ s<br>$t_{p1} = 0,30$ s<br>$t_{F2} = 0,20$ s | $t_{F1} = 0,55$ s<br>$t_{p1} = 0,30$ s<br>$t_{F2} = 0,20$ s |

Einsatzort A

Einsatzort B

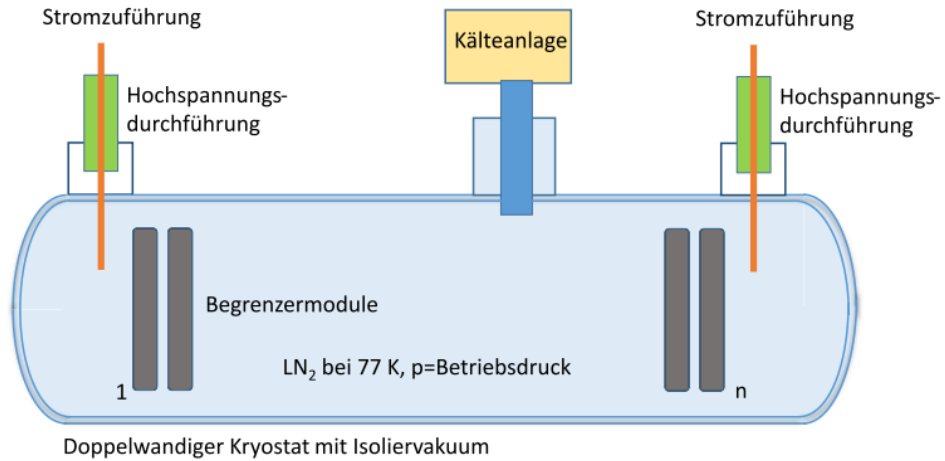
Einsatzort C



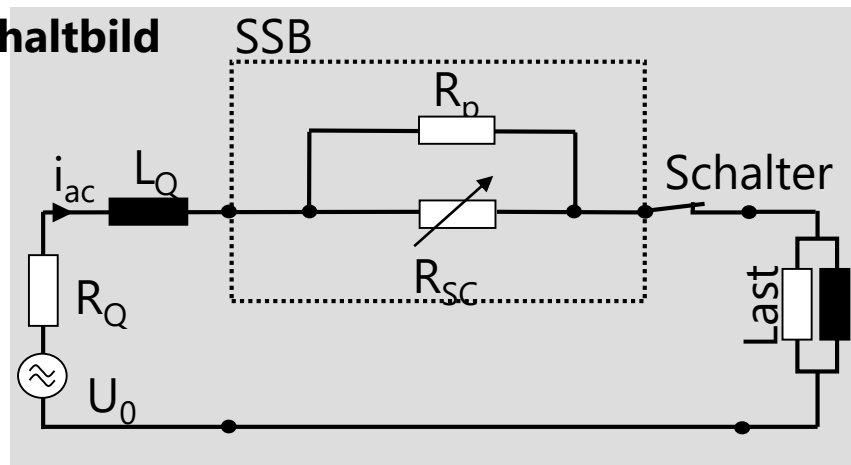
Fehlerdauern berücksichtigen den Reserveschutz

# Konzeptionelle Auslegung

## Resistiver supraleitender SB

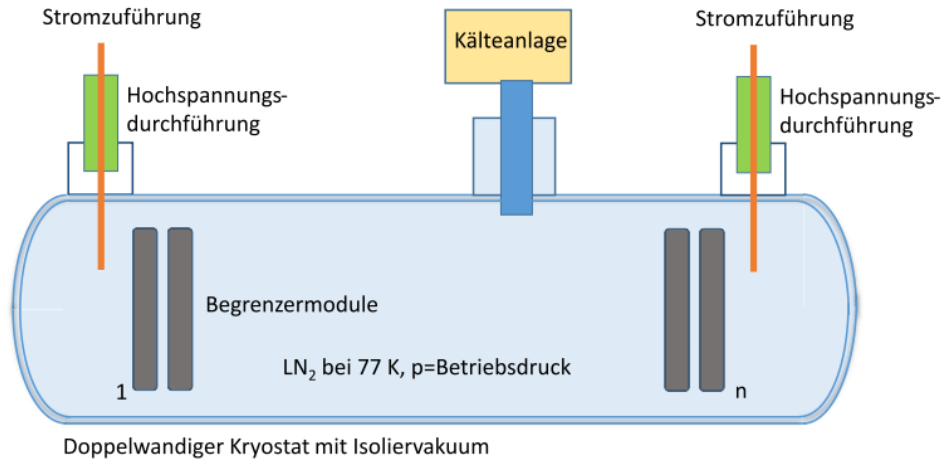


## Ersatzschaltbild

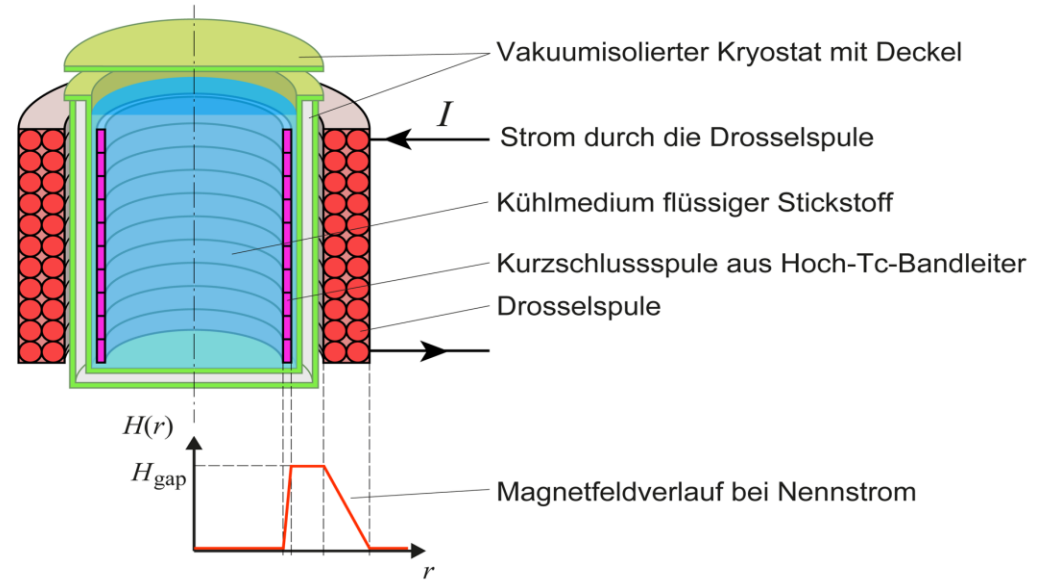


# Konzeptionelle Auslegung

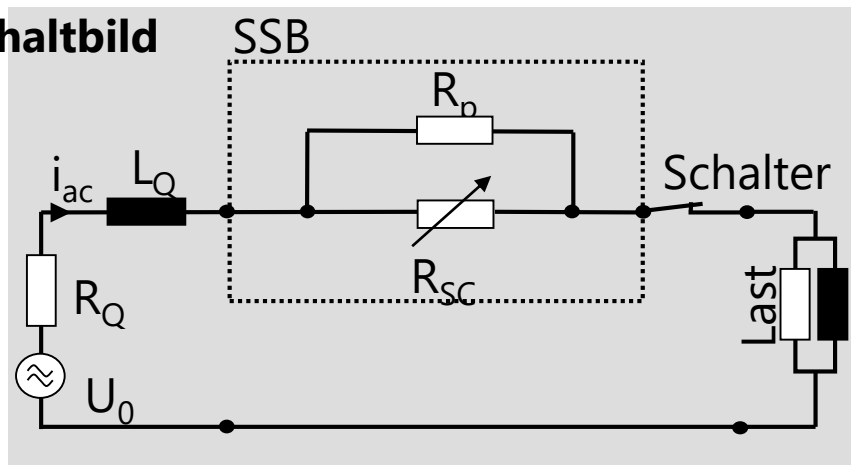
## Resistiver supraleitender SB



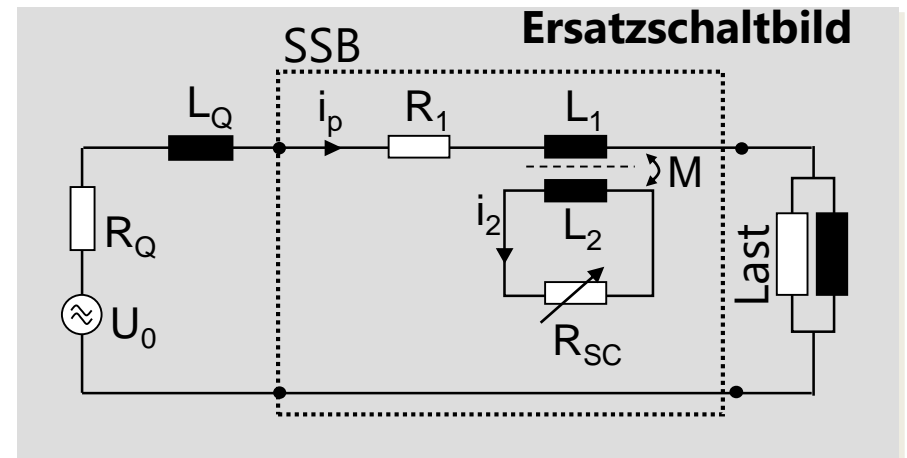
## SmartCoil: induktiver supraleitender SB



### Ersatzschaltbild



### Ersatzschaltbild

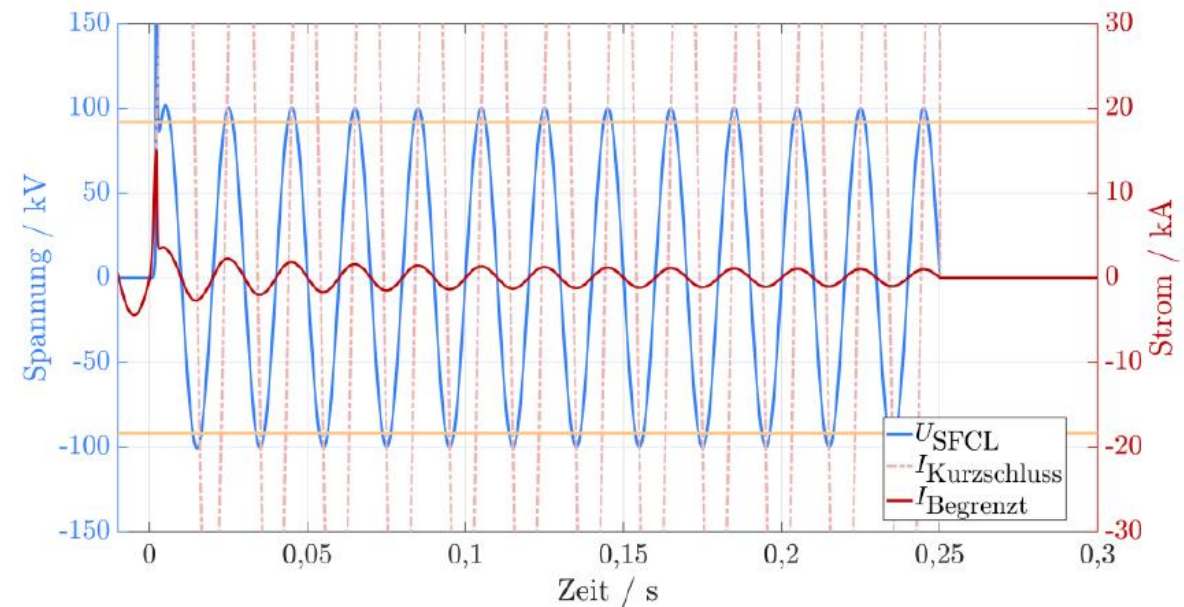
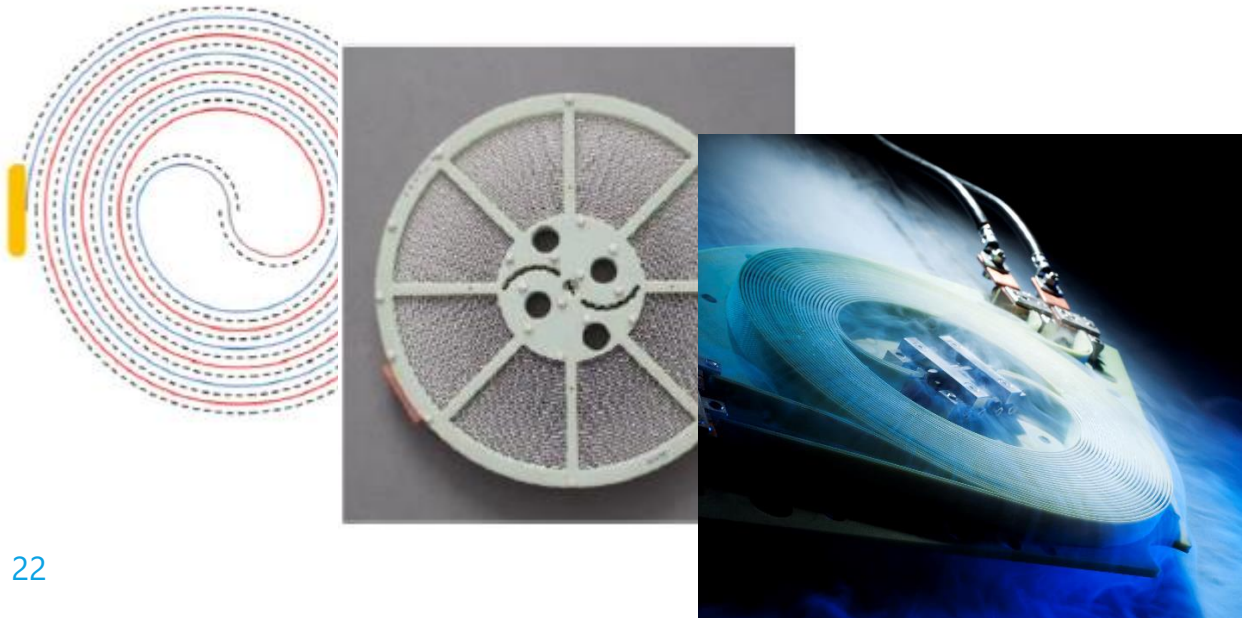


# Konzeptionelle Auslegung

- Es werden zwischen 8 km und 21 km Supraleitermaterial je Phase benötigt
- benötigten HTS-Bandlänge abhängig von:  
 $I_n$  (Nennstrom),  $U_n$  (Nennspannung),  $t_F$  (Fehlerdauer) &  $T_c$  (Nennstrom des HTS)
- Trotz Supraleitfähigkeit, ergeben sich AC-Verluste, welche zu einem Wärmeeintrag führen und LN<sub>2</sub> verdampfen lassen



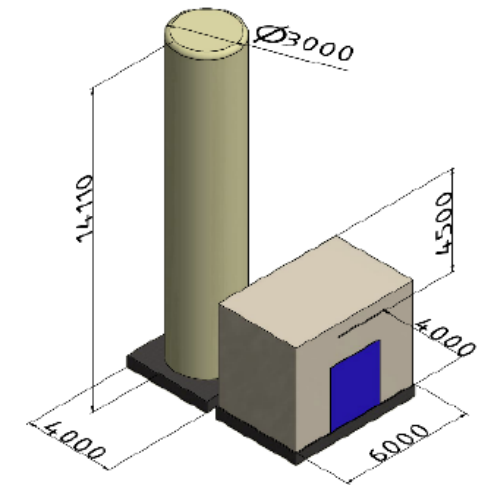
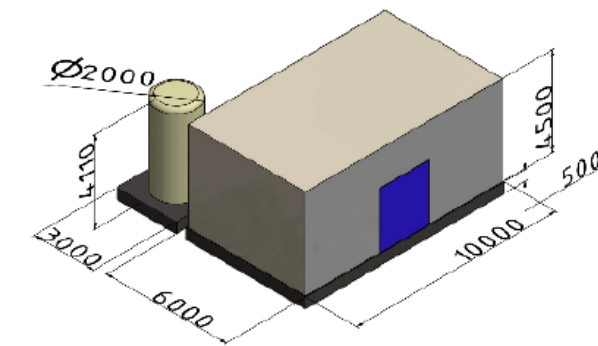
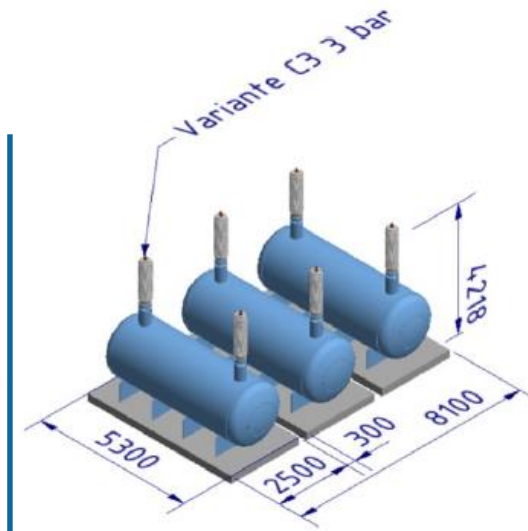
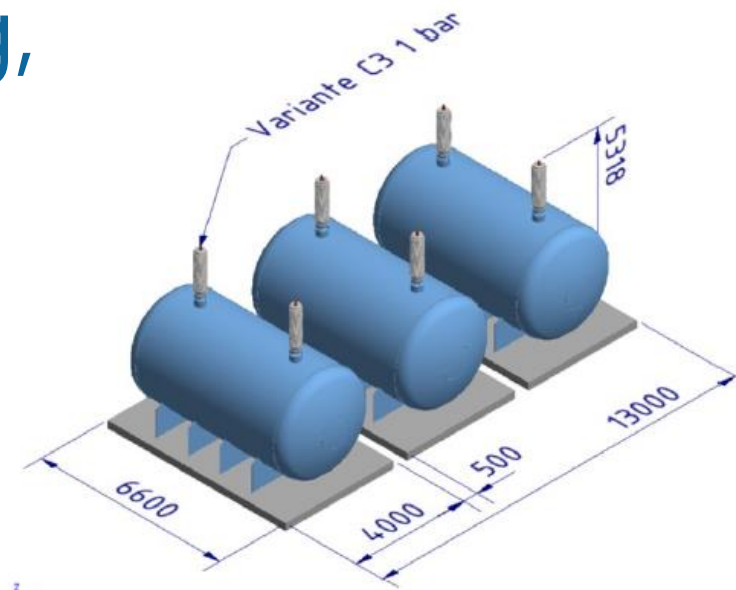
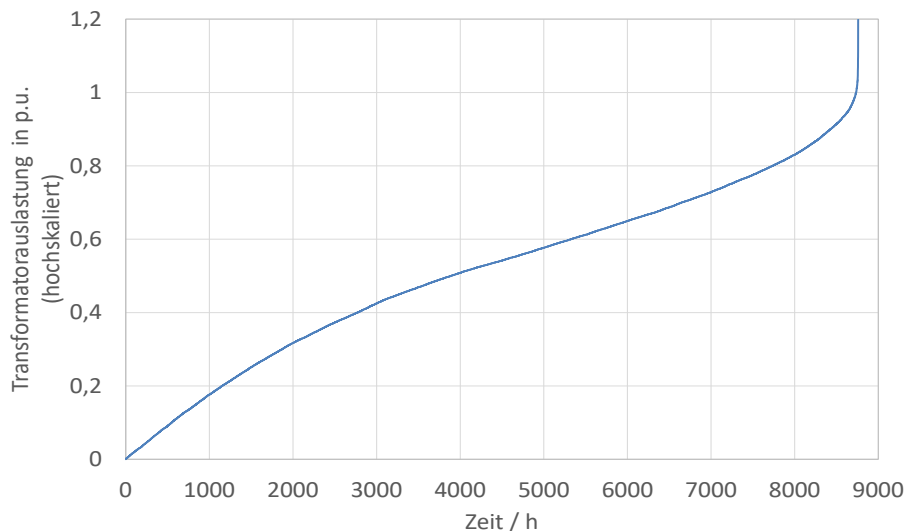
220 kV, 1200 A



# Konzeptionelle Auslegung, konstruktive Umsetzung

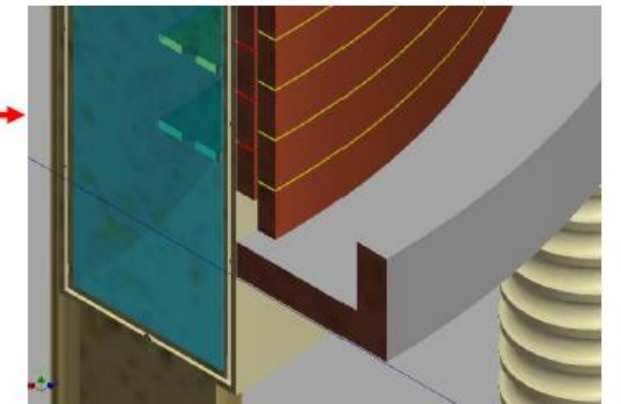
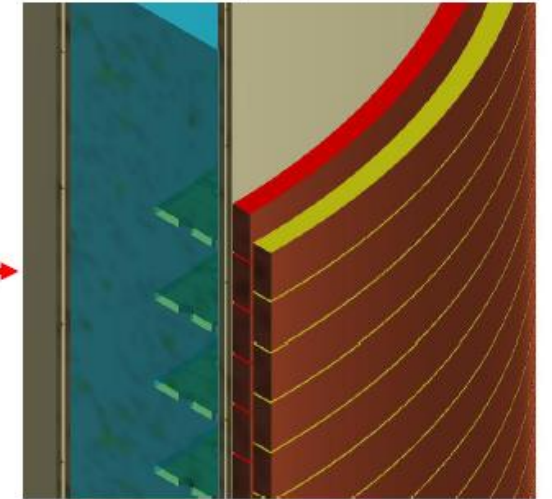
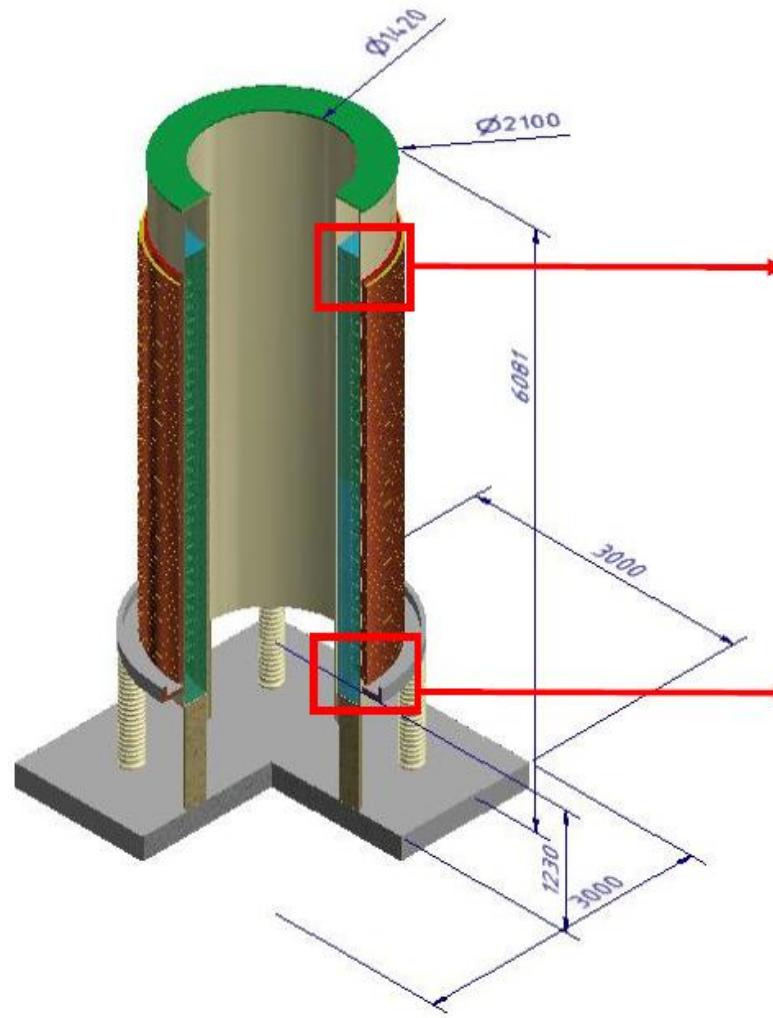
- Entsprechend hochskalierter Häufigkeitsverteilungen der Strombelastung je Einsatzort wurden Kühlbedarfe ermittelt

|   | 1 bar           |                 |                 |               |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Belastung                               | $0,3 \cdot I_n$ | $0,5 \cdot I_n$ | $0,8 \cdot I_n$ | $1 \cdot I_n$ |
| Wärmeeintrag bei 77 K<br>(aus Tab. 6-5) | 1142 W          | 1214 W          | 1716 W          | 3184 W        |
| LN <sub>2</sub> -Verbrauch              | 23 kg/h         | 24 kg/h         | 34 kg/h         | 64 kg/h       |





# Konzeptionelle Auslegung, konstruktive Umsetzung



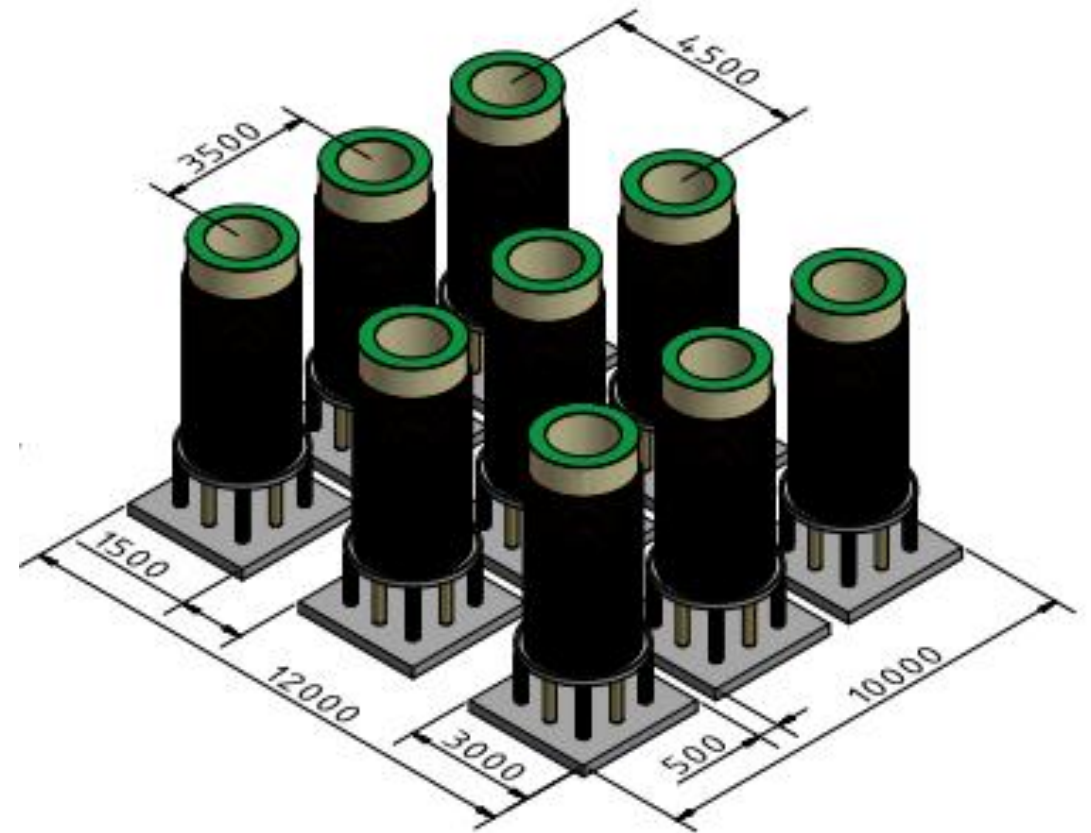
# Quickfacts: Kostenpunkte

- Investition:
  - Supraleitermaterial (~50% der Gesamtkosten)
  - Kryostatbehälter
  - MSR (Mess-Steuer-Regeltechnik)
  - Kryokühltechnik
  - Transport
- Betrieb:
  - LN<sub>2</sub> : BE- und Nachfüllung
  - Stromkosten
  - Wartung



# Konzeptionelle Auslegung, konstruktive Umsetzung

- Aktuell hat der resistive Strombegrenzer leichte Vorteile gegenüber der Smartcoil:
  - etwas geringere Verluste
  - keine Impedanz, keine Beeinflussung des Lastflusses
  - Möglichkeit der Schnellabschaltung



# Weiteres Vorgehen

- Je kritischem Standort müssen Punkte betrachtet werden:
  - Risikoabschätzung: Häufigkeit der Überschreitung
  - Zeitkritikalität
  - Wirtschaftlicher Vergleich der:
    - technischen und
    - operativen Möglichkeiten
  - Berechnung der Auswirkungen des SSB: lokal / flächig
- Trotz beachtlicher Investitions- und Betriebskosten, gibt es Standorte an denen der Einsatz von supraleitenden HS-Strombegrenzern wirtschaftlich sinnvoll sein wird.

René Steinhorst, M. Sc.

Netzplanung und Budget

T +49 361 652-3145

M +49151 1614-6021

[Rene.Steinhorst@thueringer-energienetze.com](mailto:Rene.Steinhorst@thueringer-energienetze.com)

TEN Thüringer Energienetze GmbH & Co. KG

Schwerborner Straße 30

99087 Erfurt

[www.thueringer-energienetze.com](http://www.thueringer-energienetze.com)