

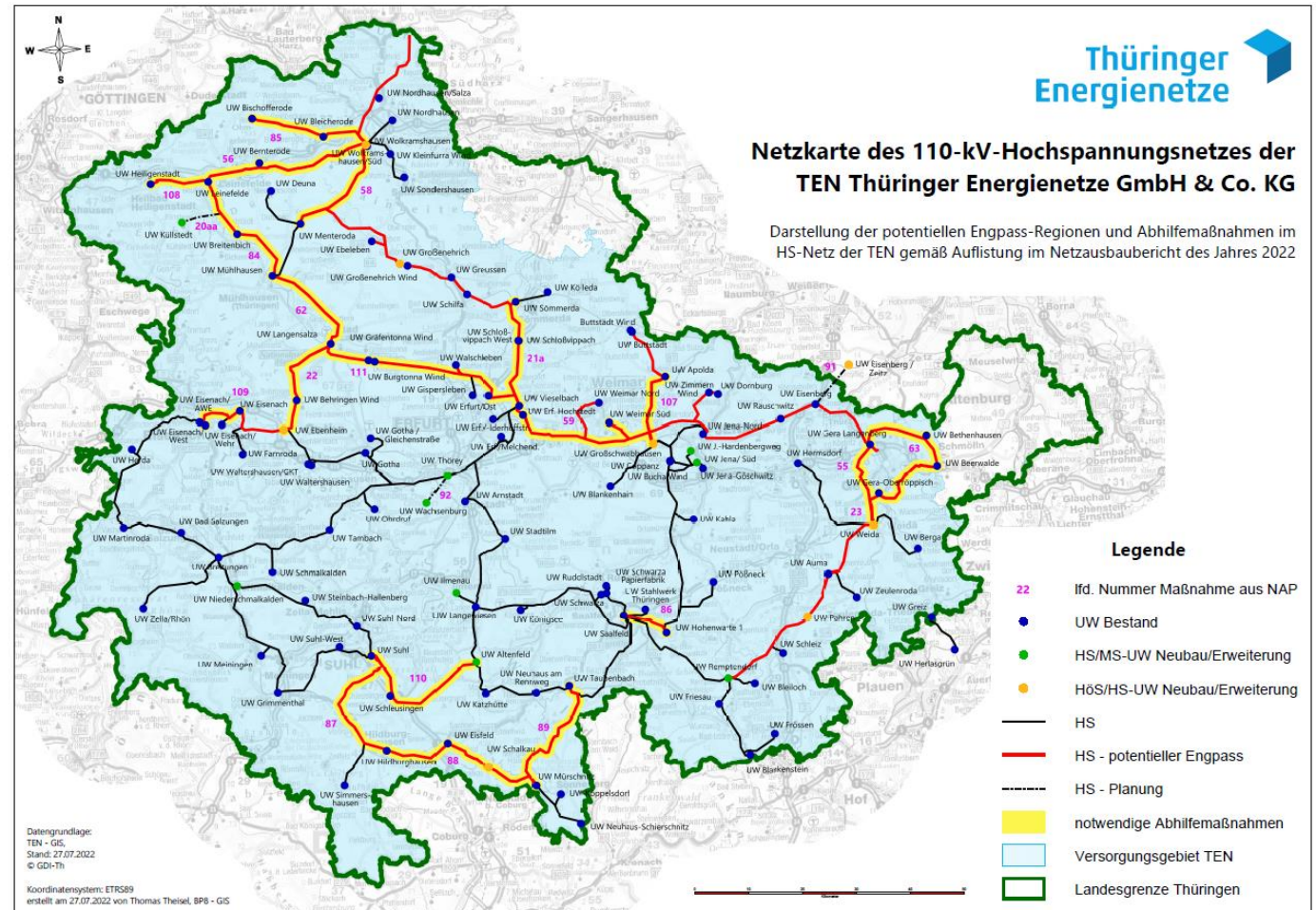
# Einsatz eines supraleitenden 110-kV-Strombegrenzers

René Steinhorst,  
TEN - Thüringer Energienetze GmbH & Co. KG

VDE-Symposium 2023, Görlitz 14./15. Juni

# Netzausbauplan (NAP) – Planungsregion OST

- Prognose und Regionalisierung der erneuerbaren Energien
- Zunahme der Rückspeiseleistung zum ÜNB
- Suche nach technisch-wirtschaftlich günstigsten Netzausbaumaßnahmen

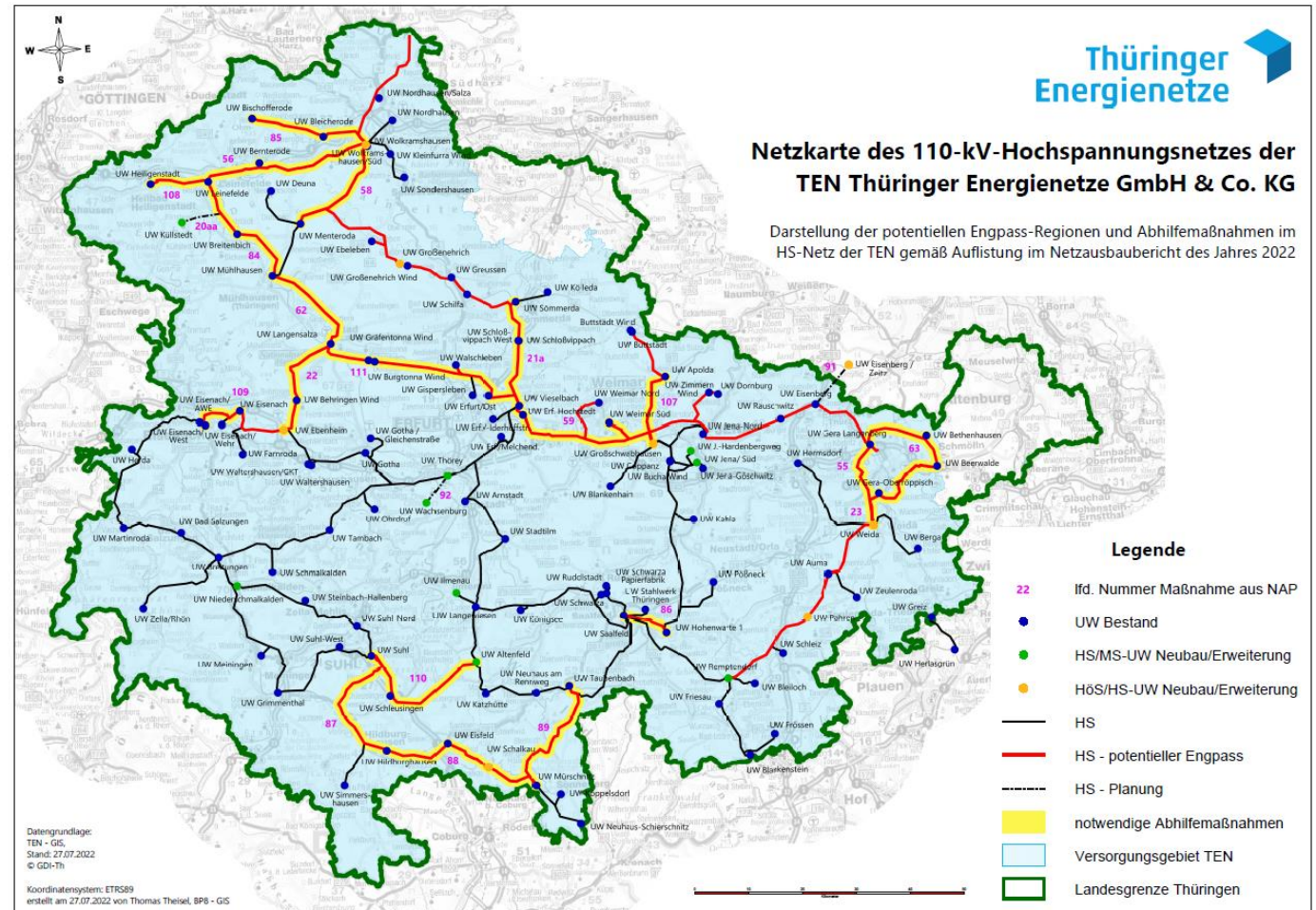


Auszug aus dem NAP22, Quelle:

[https://www.thueringer-energienetze.com/Ueber\\_uns/Veroeffentlichungspflichten/Netzdaten#Netzausbau](https://www.thueringer-energienetze.com/Ueber_uns/Veroeffentlichungspflichten/Netzdaten#Netzausbau)

# Netzausbauplan (NAP) – Planungsregion OST

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



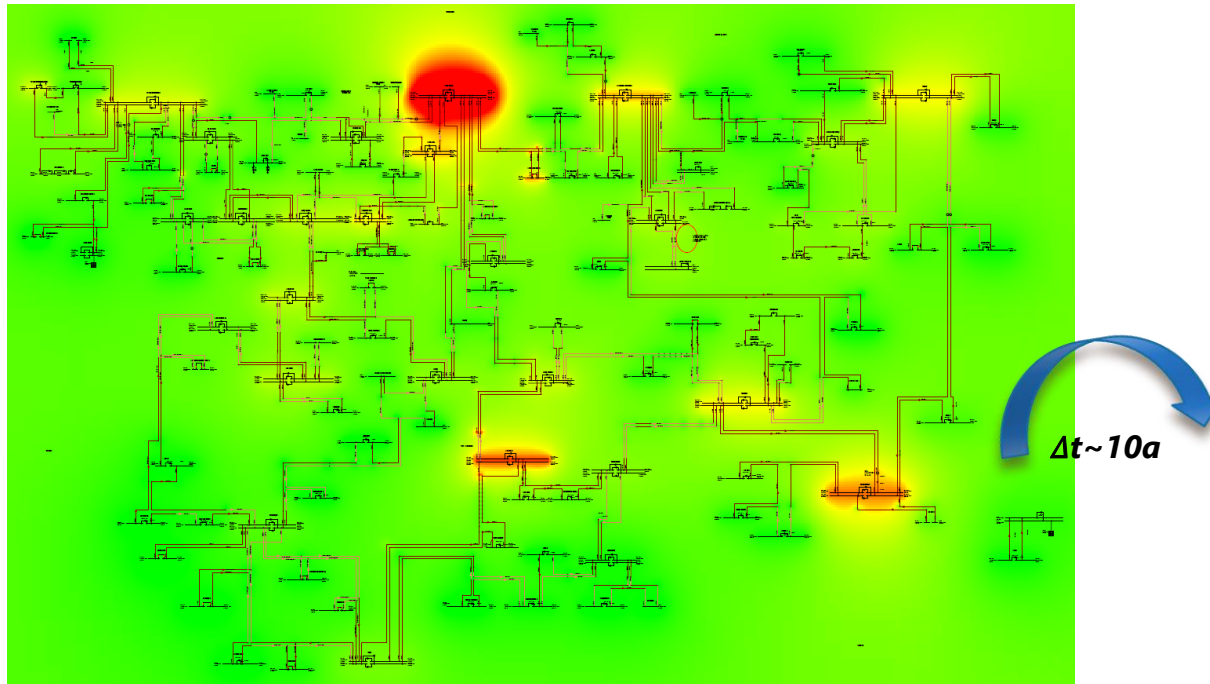
Auszug aus dem NAP22, Quelle:

[https://www.thueringer-energienetze.com/Ueber\\_uns/Veroeffentlichungspflichten/Netzdaten#Netzausbau](https://www.thueringer-energienetze.com/Ueber_uns/Veroeffentlichungspflichten/Netzdaten#Netzausbau)



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

**zunehmender Bedarf an Kurzschlussstrombegrenzungsmaßnahmen**



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

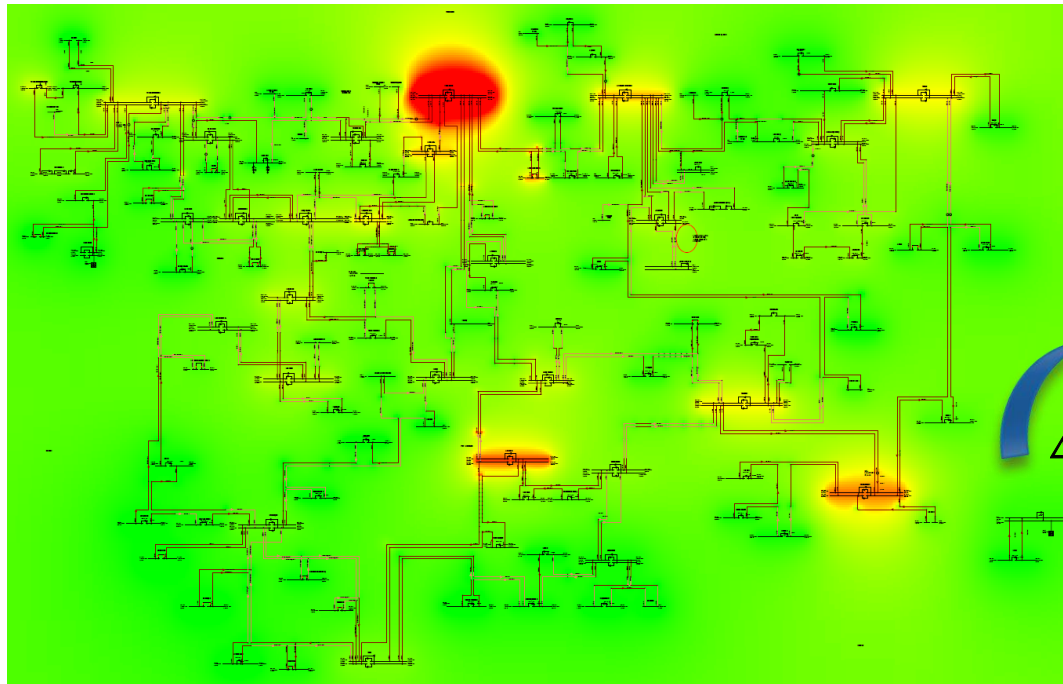
**ISO-Fläche - Kurzschluss:  $I_k''$**

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

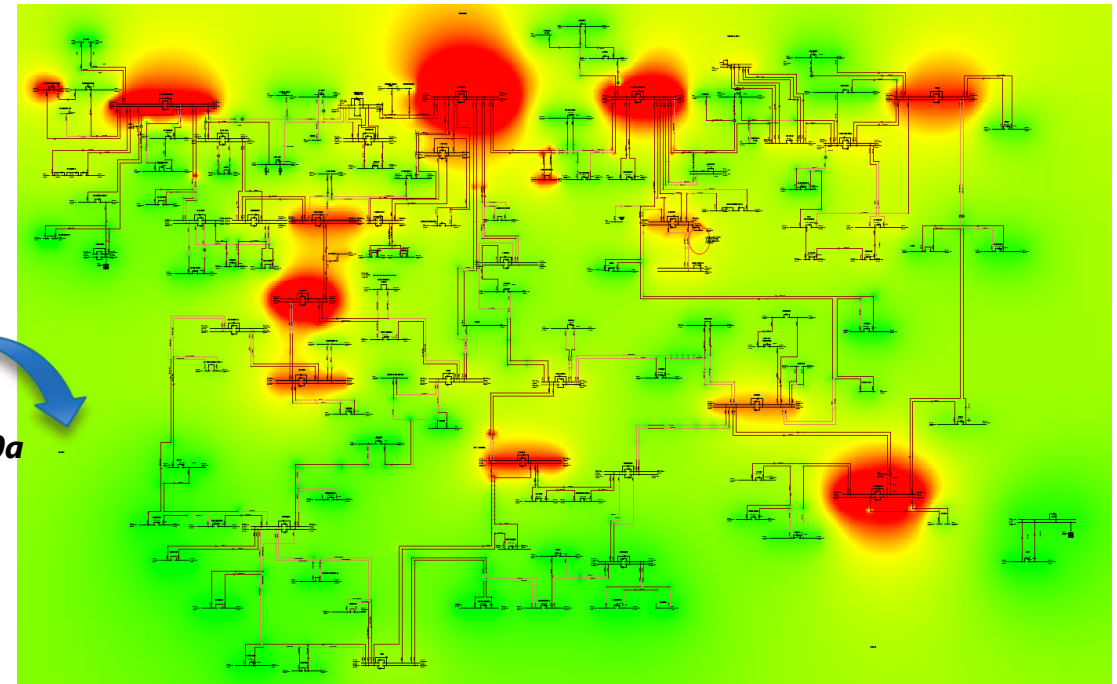
Hinweis: rote Flächen  $\neq$  Überschreitung der  $I_{k3}''$ -Festigkeit eines Umspannwerkes

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

**zunehmender Bedarf an Kurzschlussstrombegrenzungsmaßnahmen**



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



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

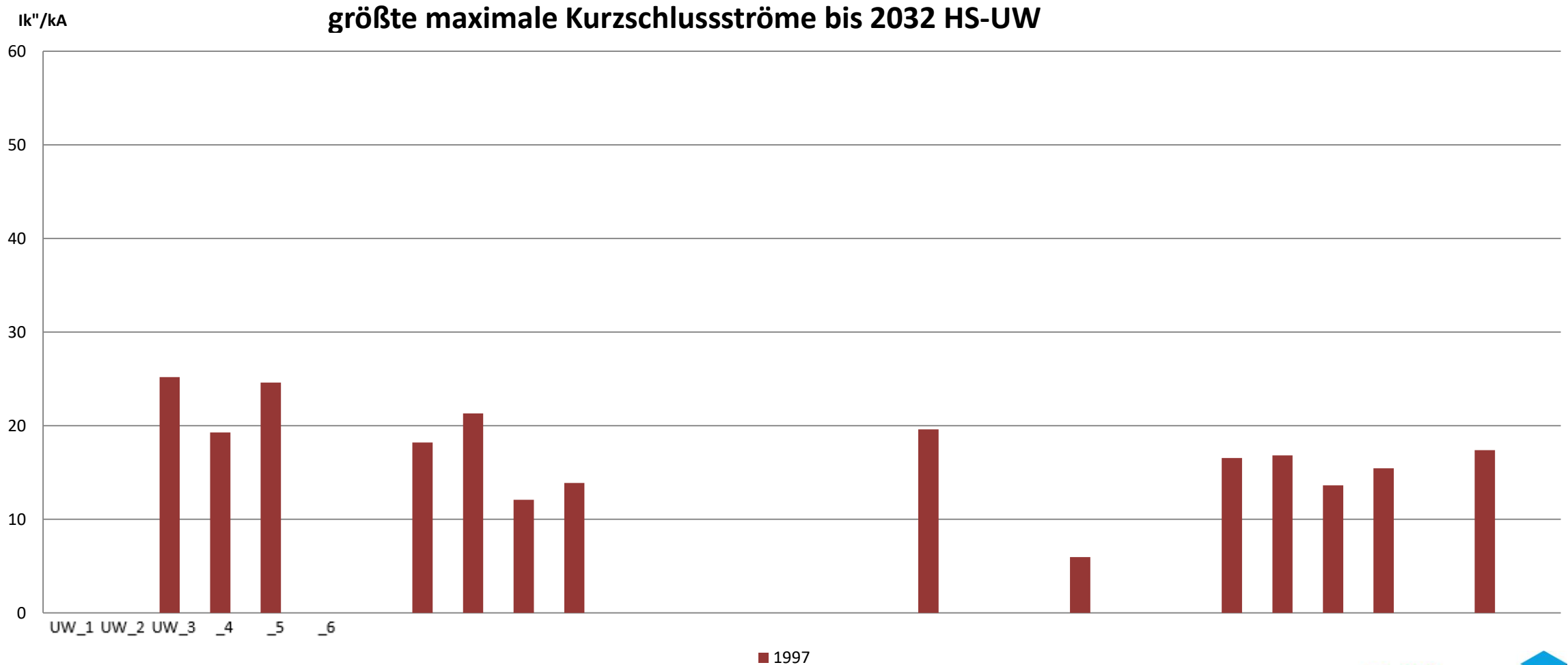
$\Delta t \sim 10a$

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

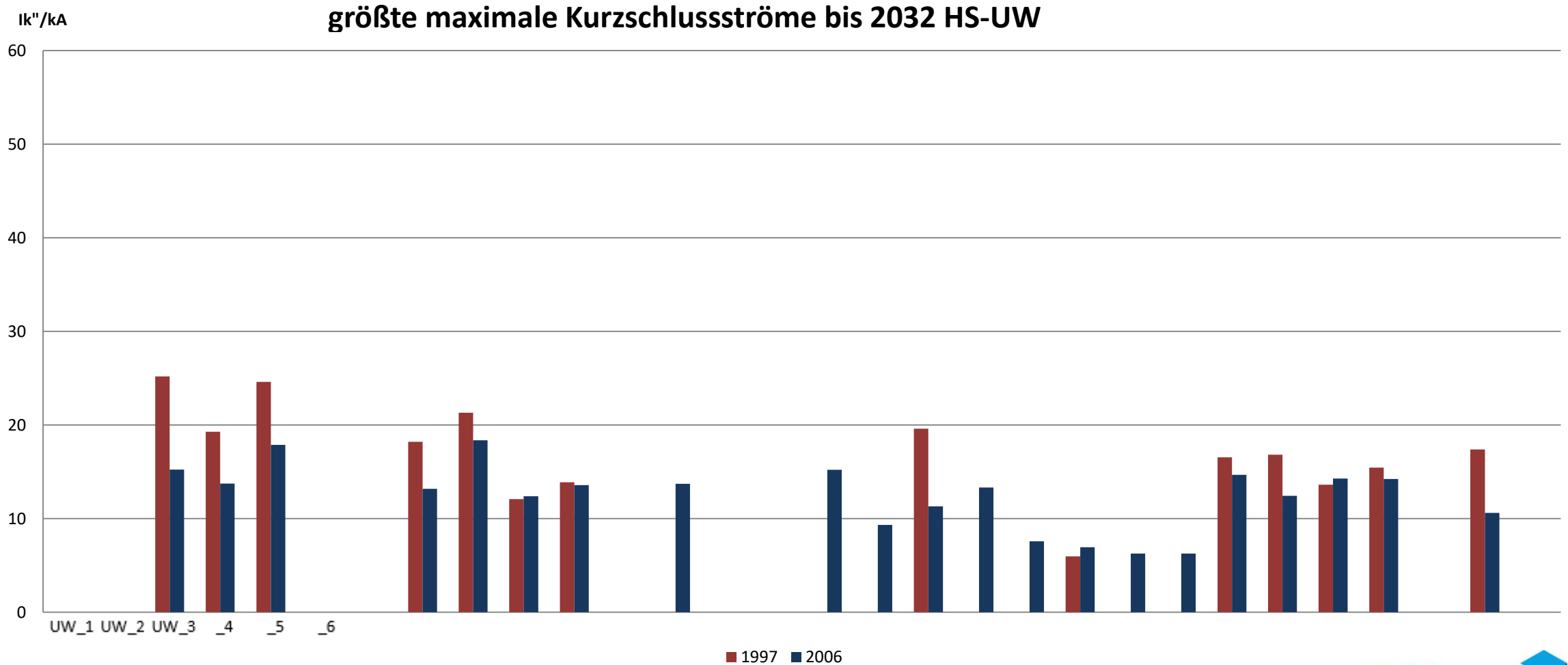
- 10,0 kA
- 25,0 kA
- 31,5 kA

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

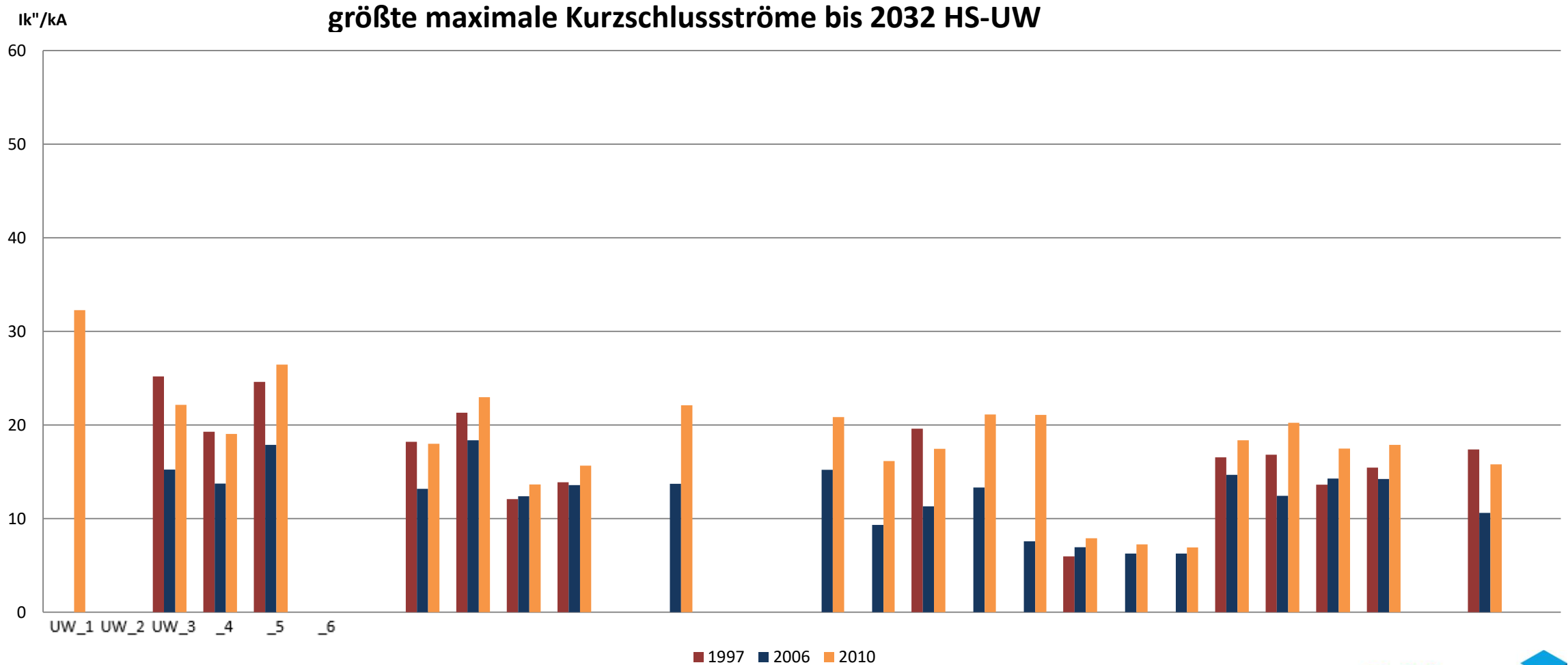
# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz



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

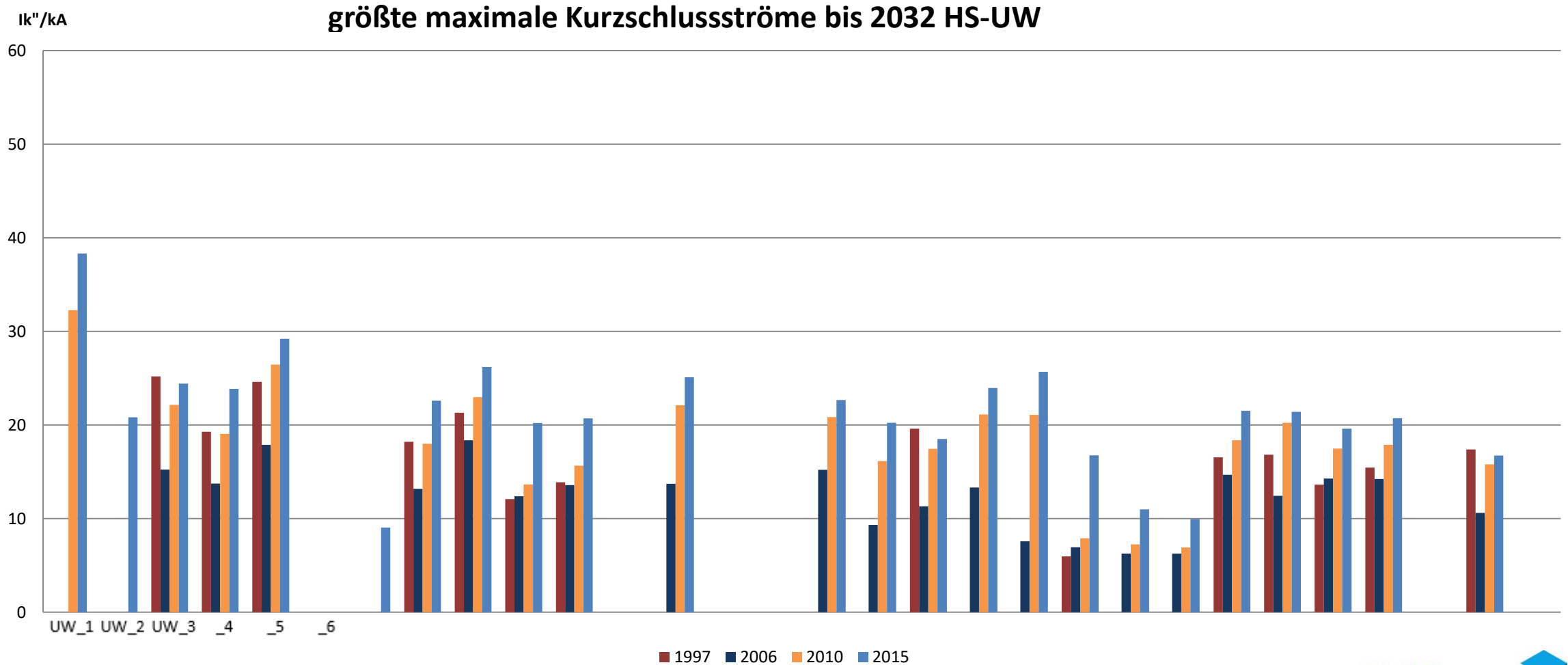


# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz

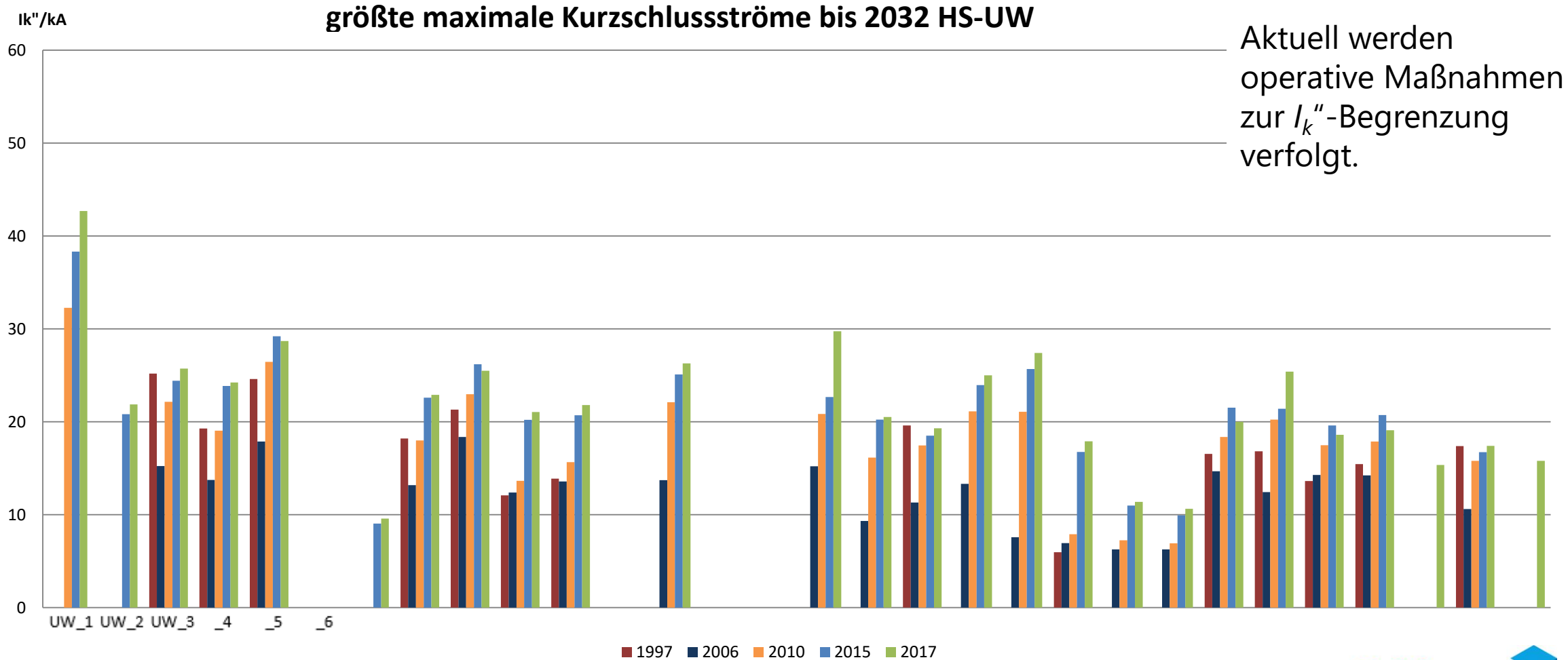




# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz

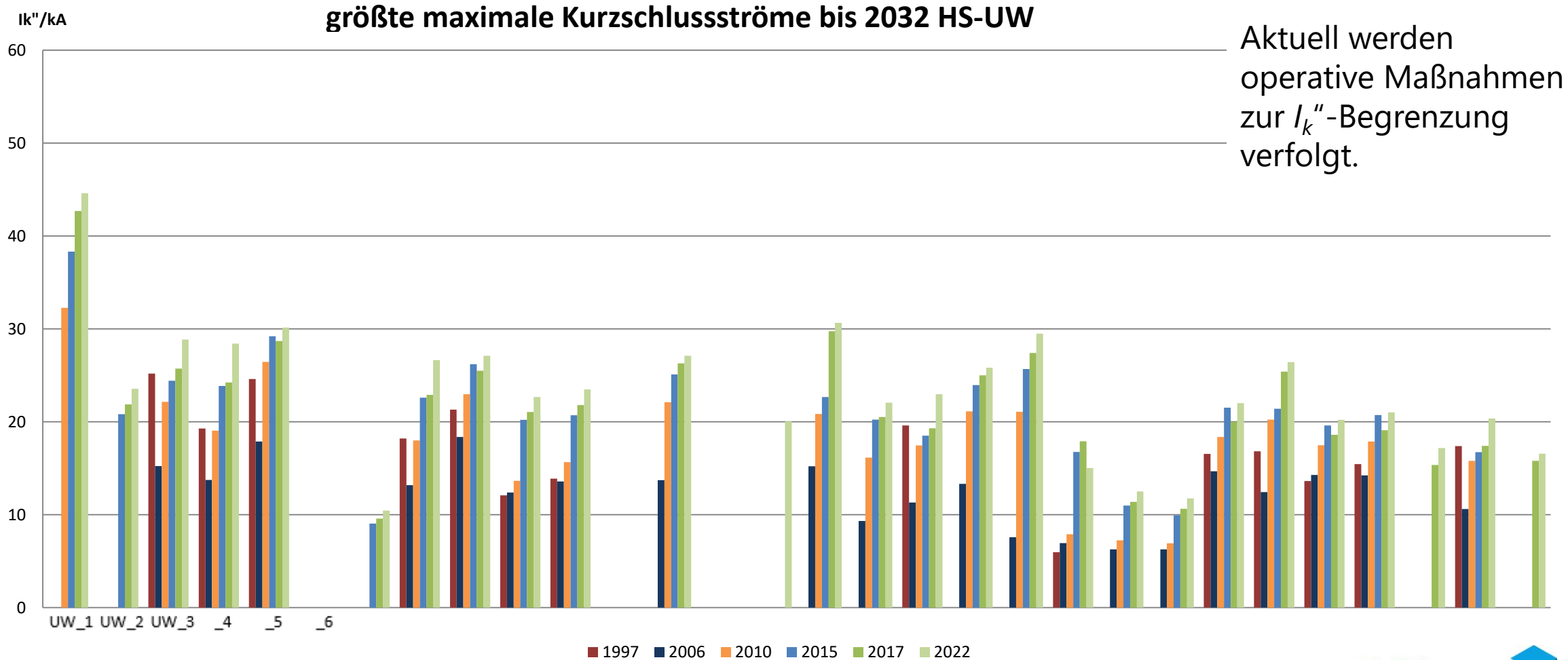


# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz

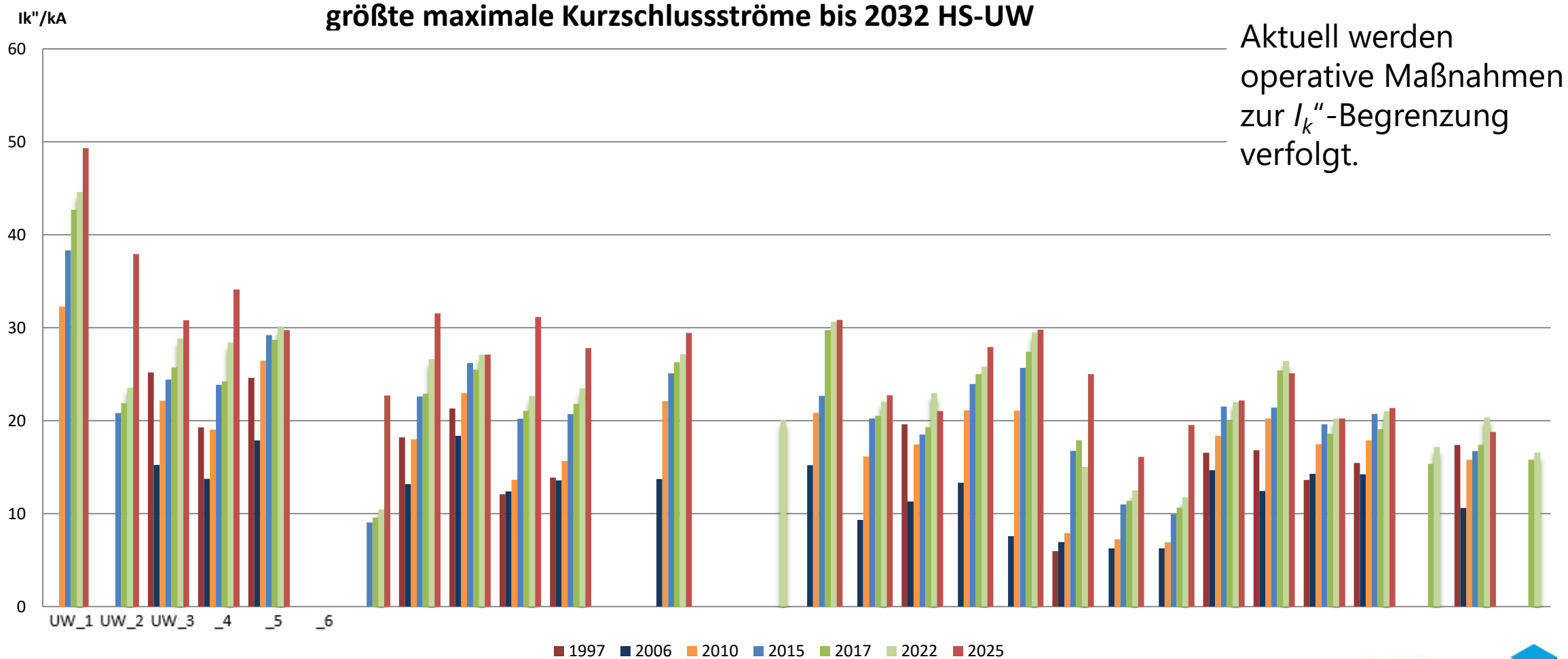


Aktuell werden operative Maßnahmen zur  $I_k''$ -Begrenzung verfolgt.

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

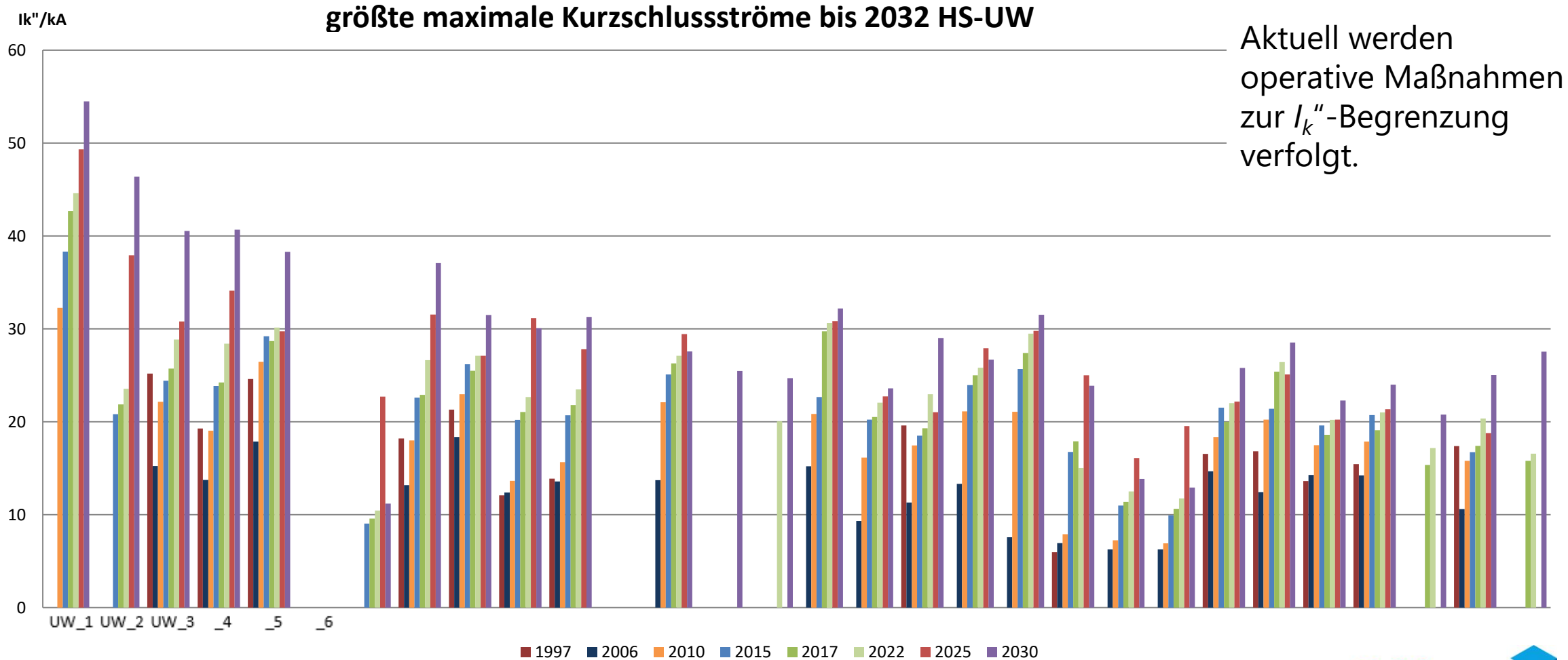


# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz



Aktuell werden operative Maßnahmen zur  $I_k''$ -Begrenzung verfolgt.

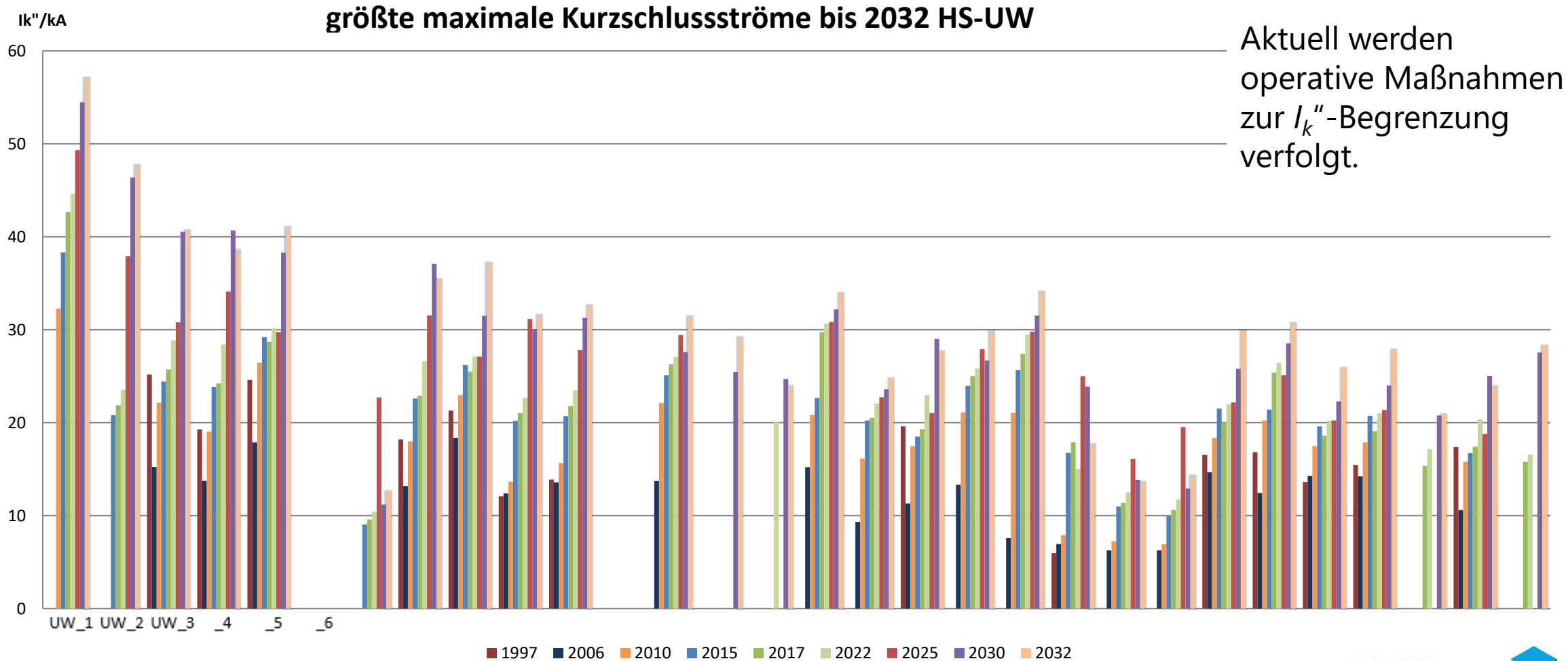
# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz



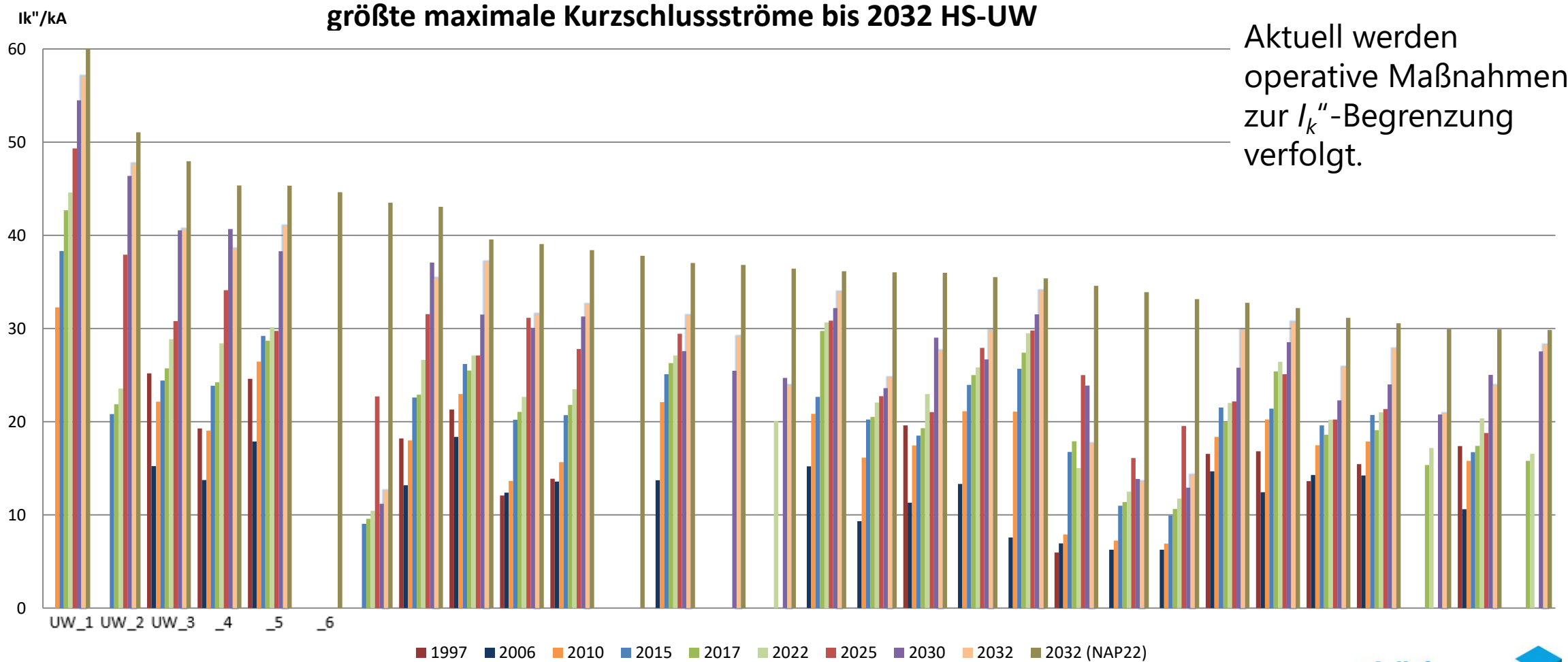
Aktuell werden operative Maßnahmen zur  $I_k''$ -Begrenzung verfolgt.



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

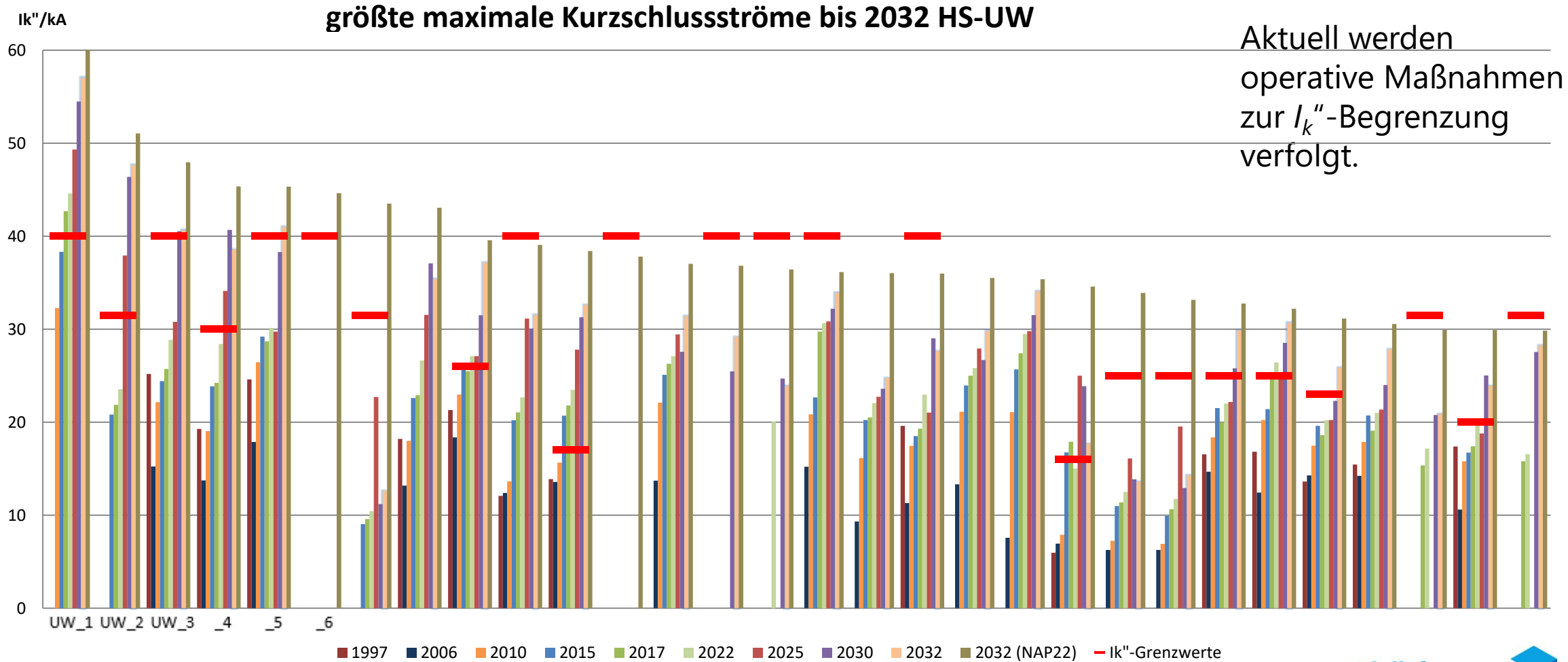


# Entwicklung des $I_{k3}''_{max}$ im TEN-HS-Netz



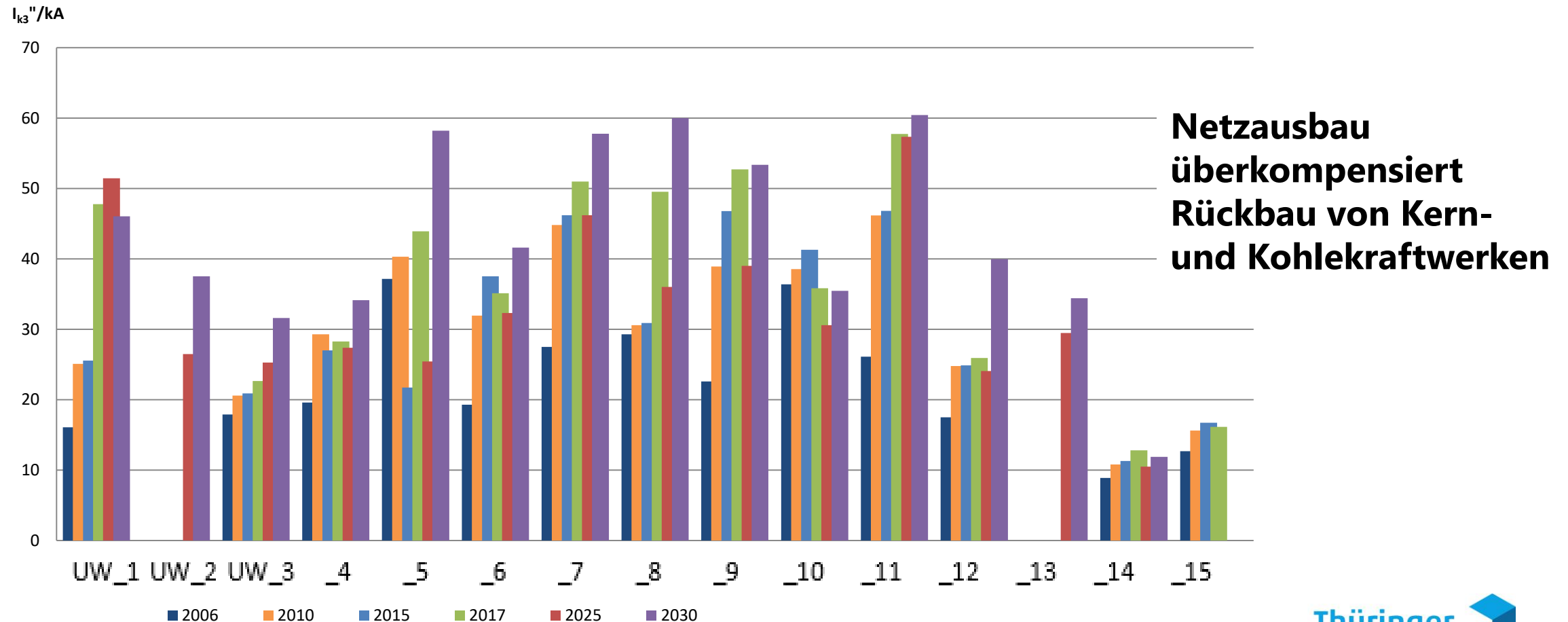
Aktuell werden operative Maßnahmen zur  $I_k''$ -Begrenzung verfolgt.

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



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

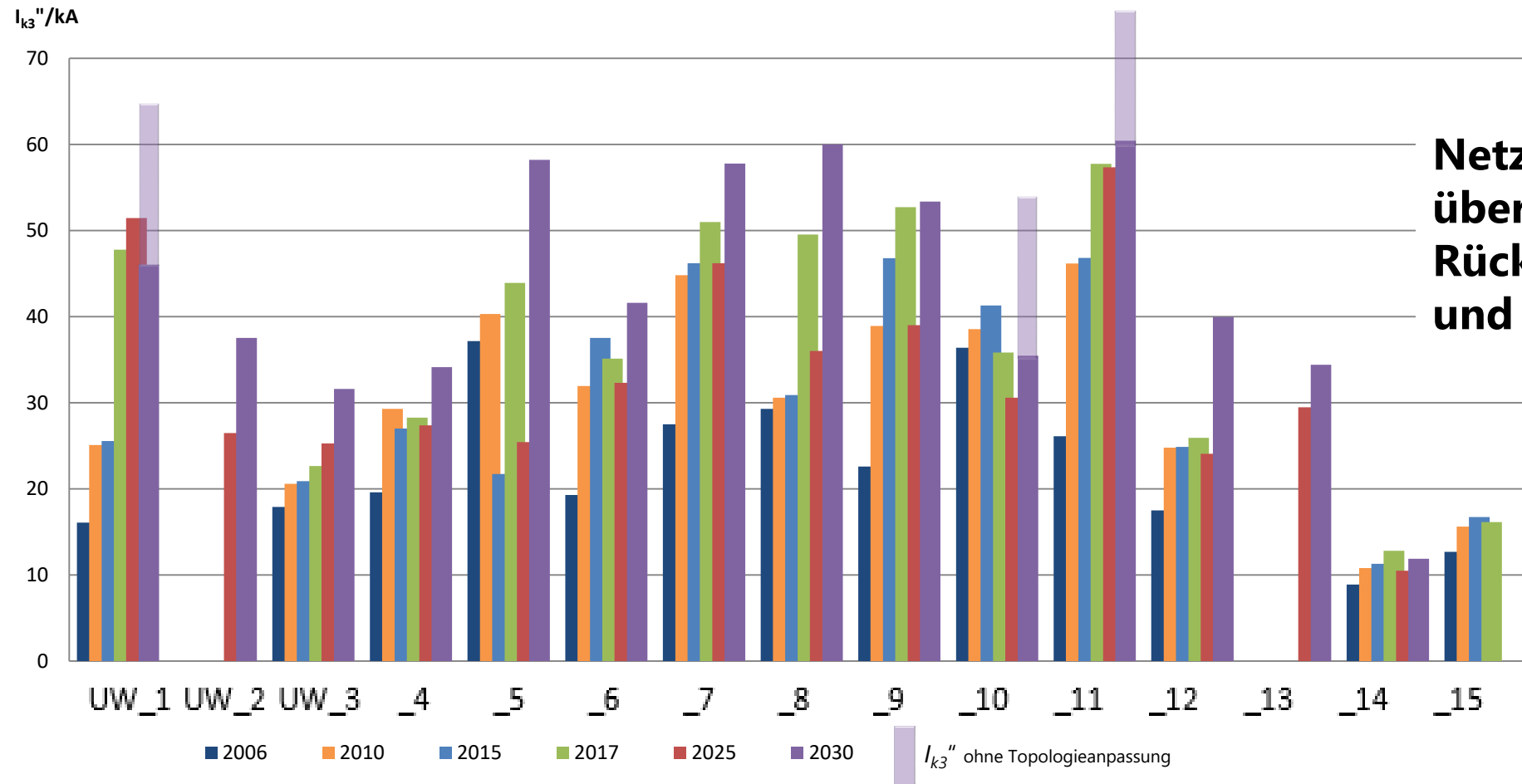
## Entwicklung $I_k''_{max}$ HöS/HS-UW



Hinzu kommen bis 2030 weitere HöS/HS-UWs: Ebenheim, Eisenberg/Zeit, Grafenrheinfeld, Querfurt

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

Entwicklung  $I_k''_{max}$  HöS/HS-UW



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



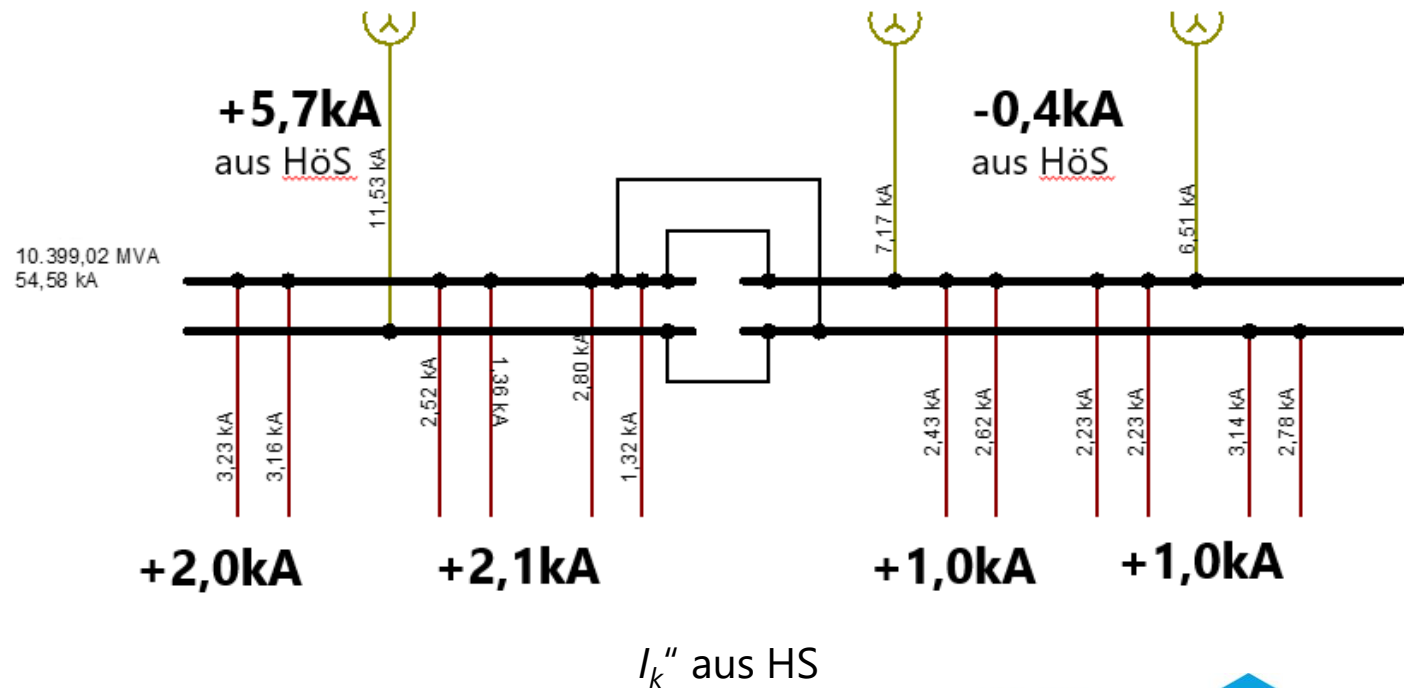
# Fallbetrachtung eines ausgewählten Umspannwerkes

## 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
Kurzschlussstrombegrenzungs-drosseln	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	<b>nicht nur MS geeignet!</b>
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

## Eigenschaften, Einsatzort, Fehlerverlauf

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

# Drossel

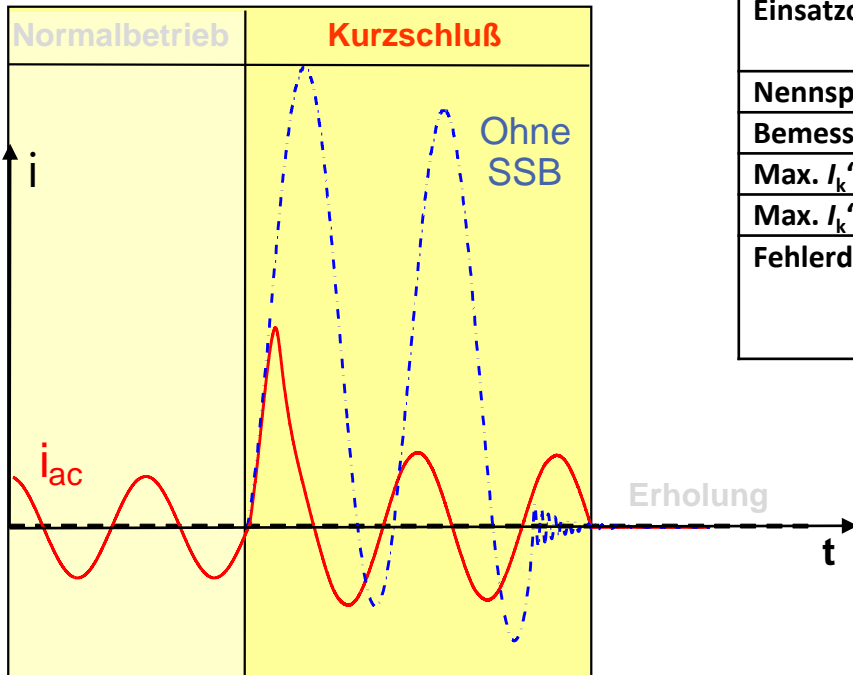
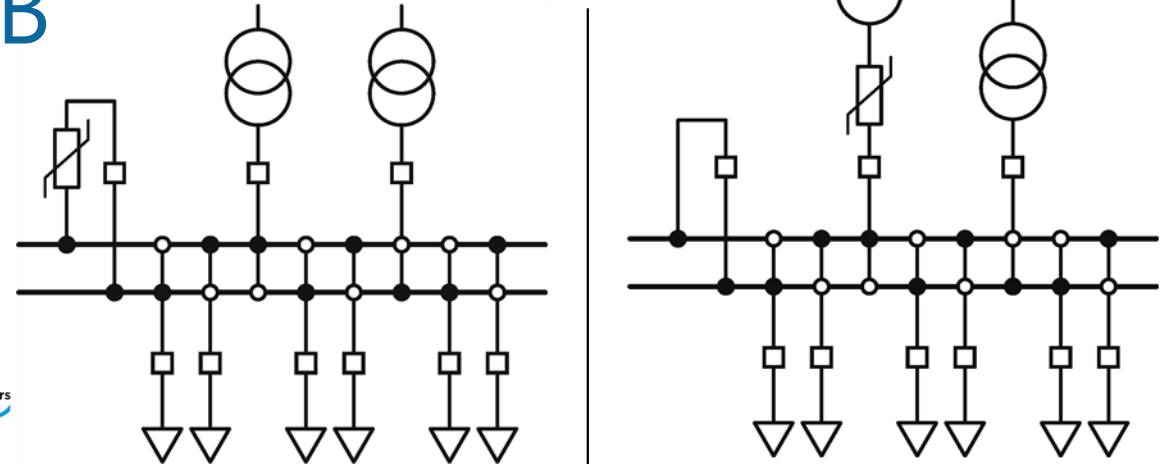
# <-> supraleitender Strombegrenzer

	Kurzschlussstrombegrenzungsdrossel	SSB (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
	- hohe Spannungsqualität (hohe „theoretische“ Kurzschlussleistung im Netz)	
<b>Nachteile</b>	- Q-Kompensation notwendig	- erhöhte Anschaffungskosten
	- Spannungsfall (Last- und Erzeugungsszenario)	
	- Verschiebung des Leistungsflusses im vermaschten Netz (beeinflusst Netzausbaubedarfe)	
	- Zus. Wirkleistungsverluste	



# Anforderungen an den SSB

Es wurden gemeinsam universelle Spezifikationen eines potentiellen SSB erkundet.

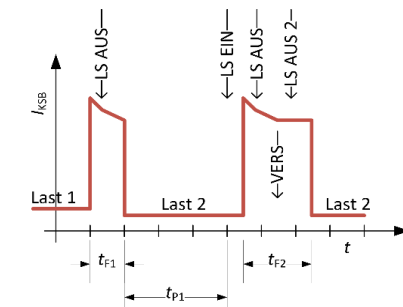
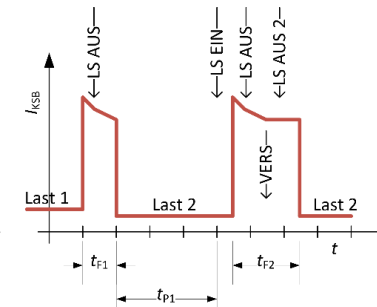
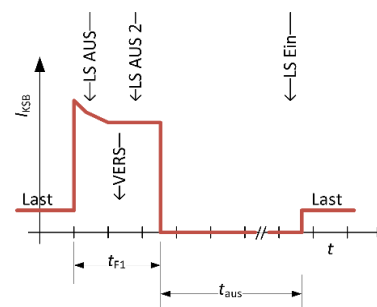


Einsatzort	Sammelschienenkupplung		Transformatoreinspeisung
	A Kupplung öffnen	B Fault ride through	C Fault ride through
Nennspannung $U_n$	110 kV	110 kV	110 kV
Bemessungsstrom $I_r$	3,15 kA	3,15 kA	2,1 kA
Max. $I_k''$ (ohne Begrenzer)	50 kA	50 kA	13 kA
Max. $I_k''$ (mit Begrenzer)	6,5 kA	6,5 kA	4,5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

Einsatzort A

Einsatzort B

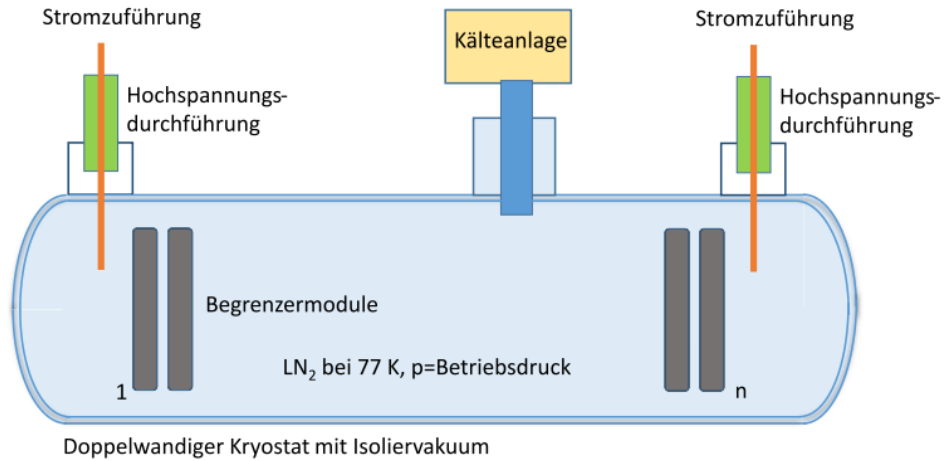
Einsatzort C



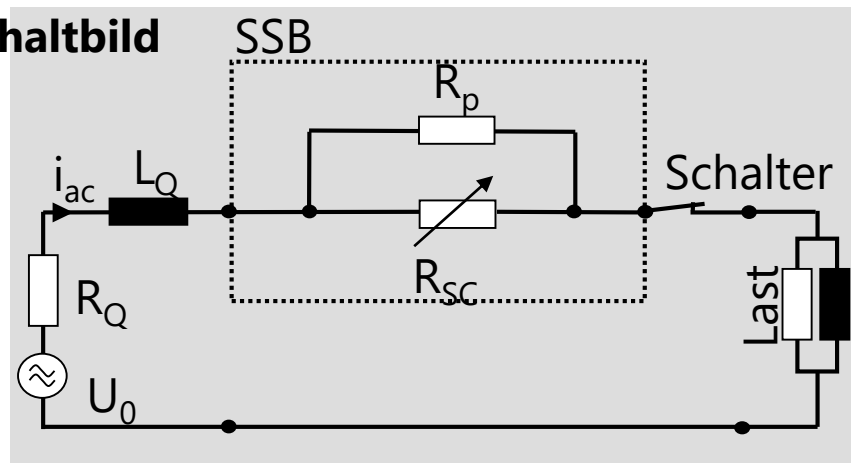
Fehlerdauern berücksichtigen den Reserveschutz

# Konzeptionelle Auslegung

## Resistiver supraleitender SB

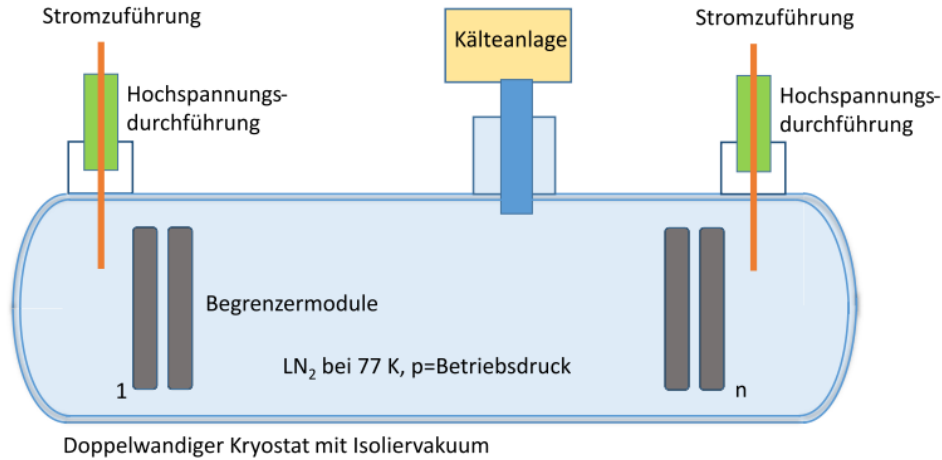


## Ersatzschaltbild

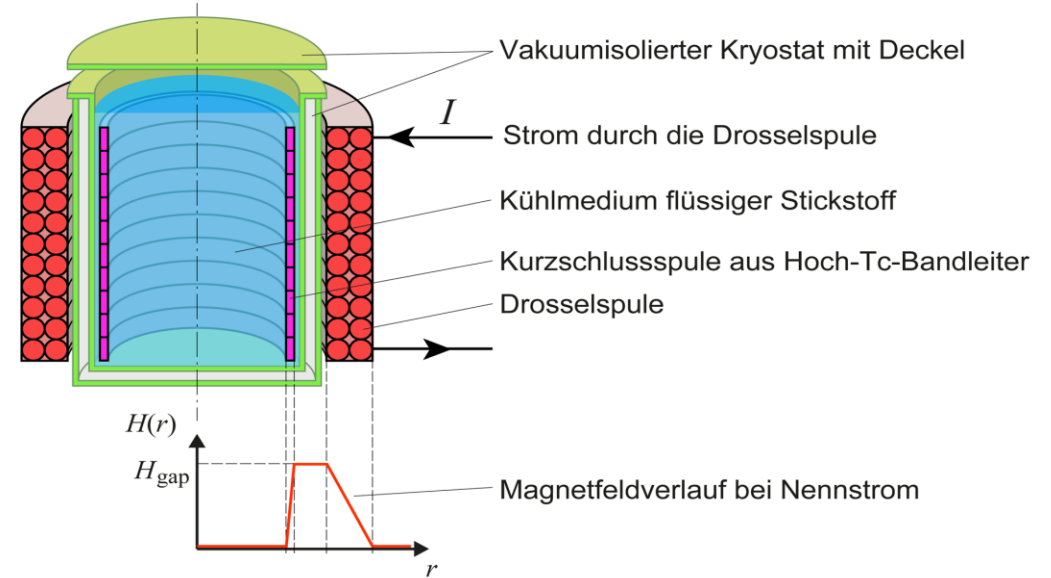


# Konzeptionelle Auslegung

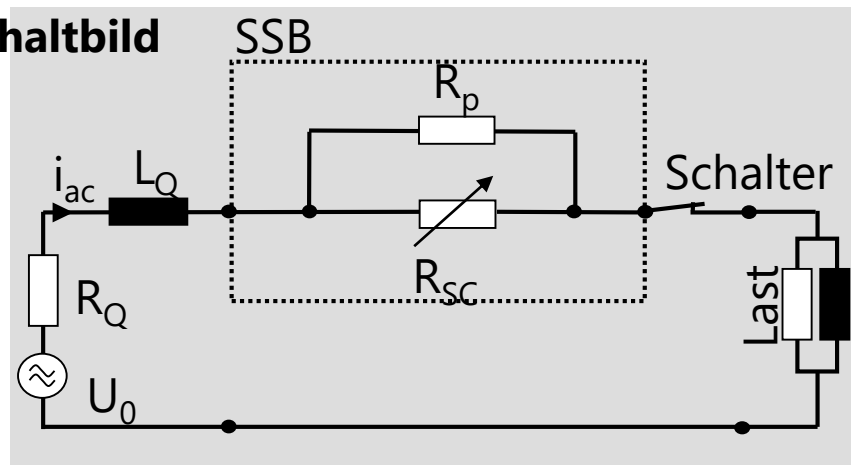
## Resistiver supraleitender SB



## SmartCoil: induktiver supraleitender SB

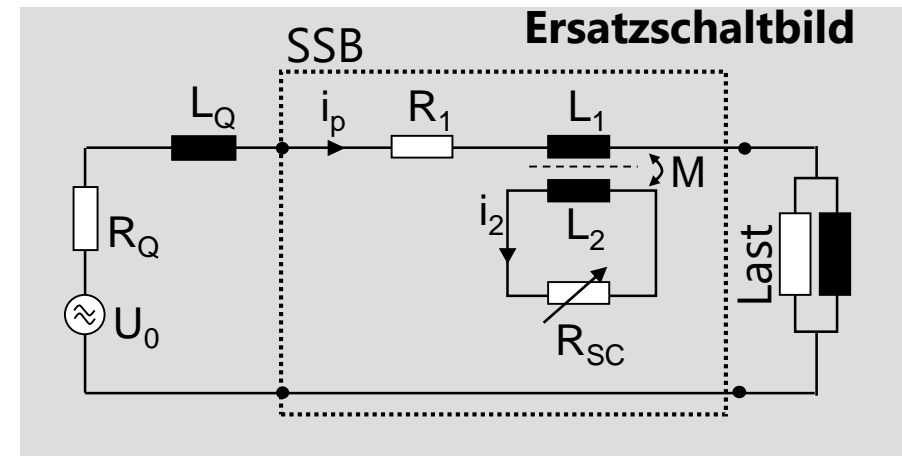


### Ersatzschaltbild



### SSB

### Ersatzschaltbild

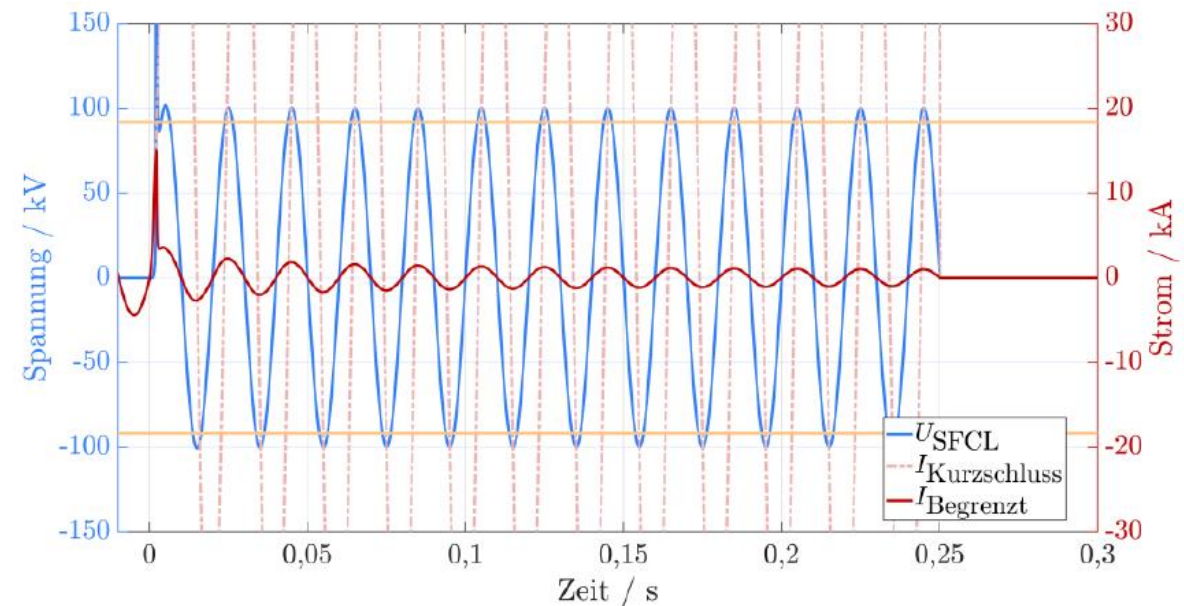
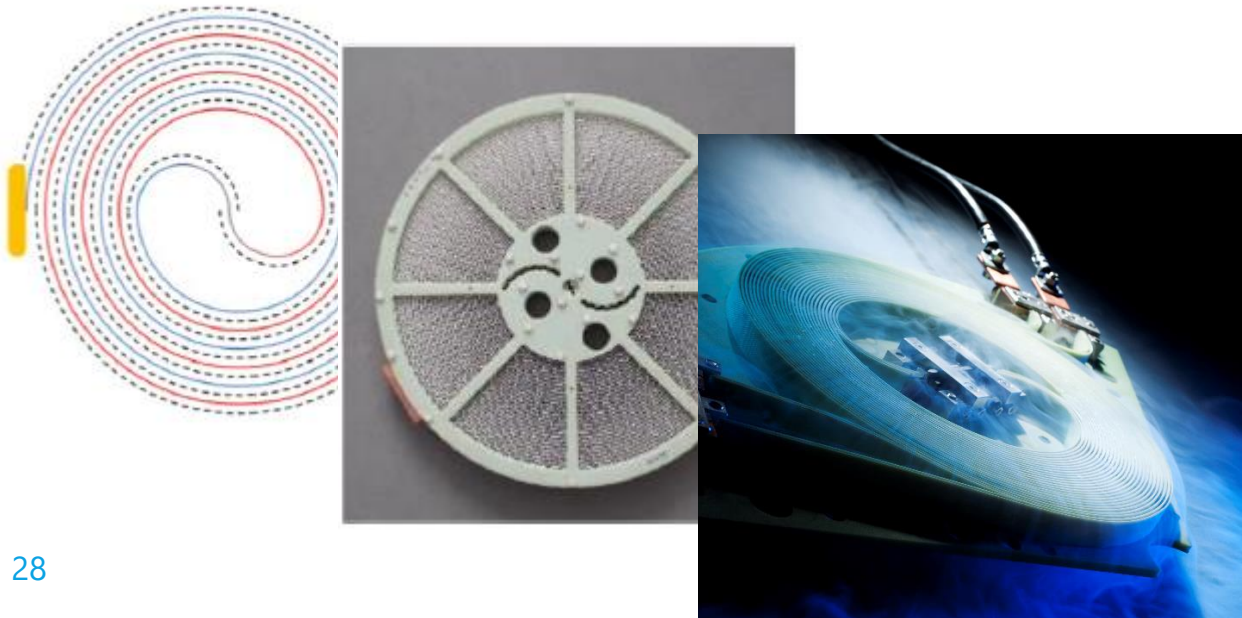


# Konzeptionelle Auslegung

- 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



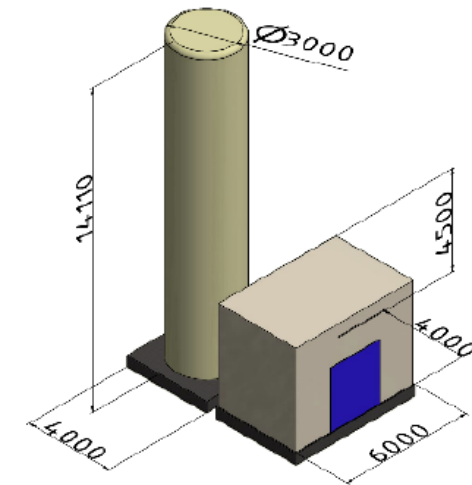
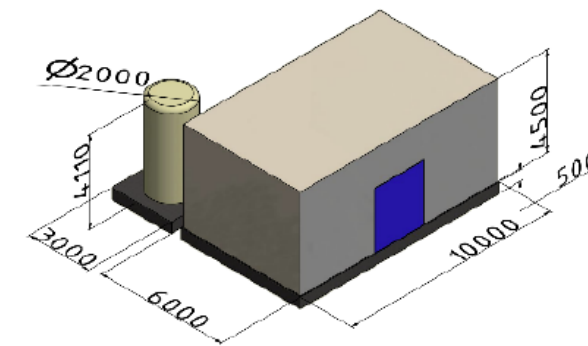
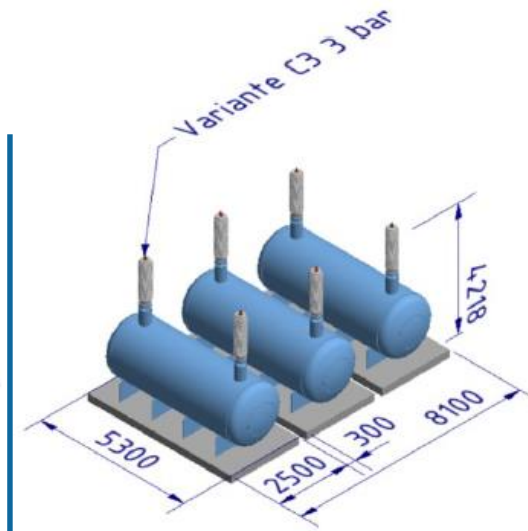
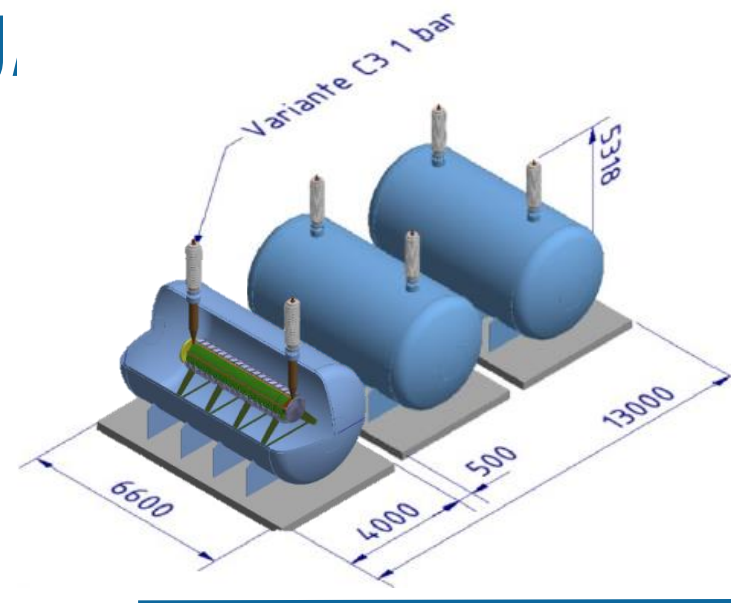
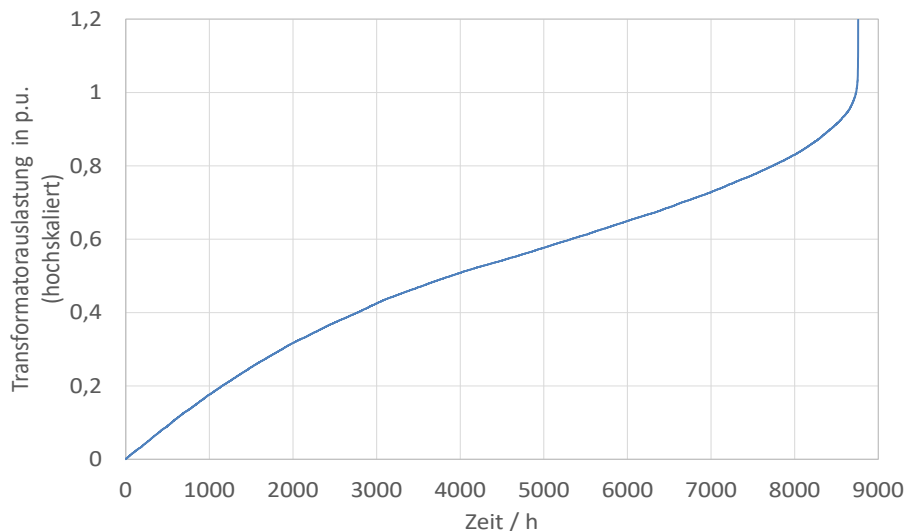
Anwendung ins Moskau:  
220 kV, 1200 A



# Konzeptionelle Auslegung, konstruktive Umsetzung

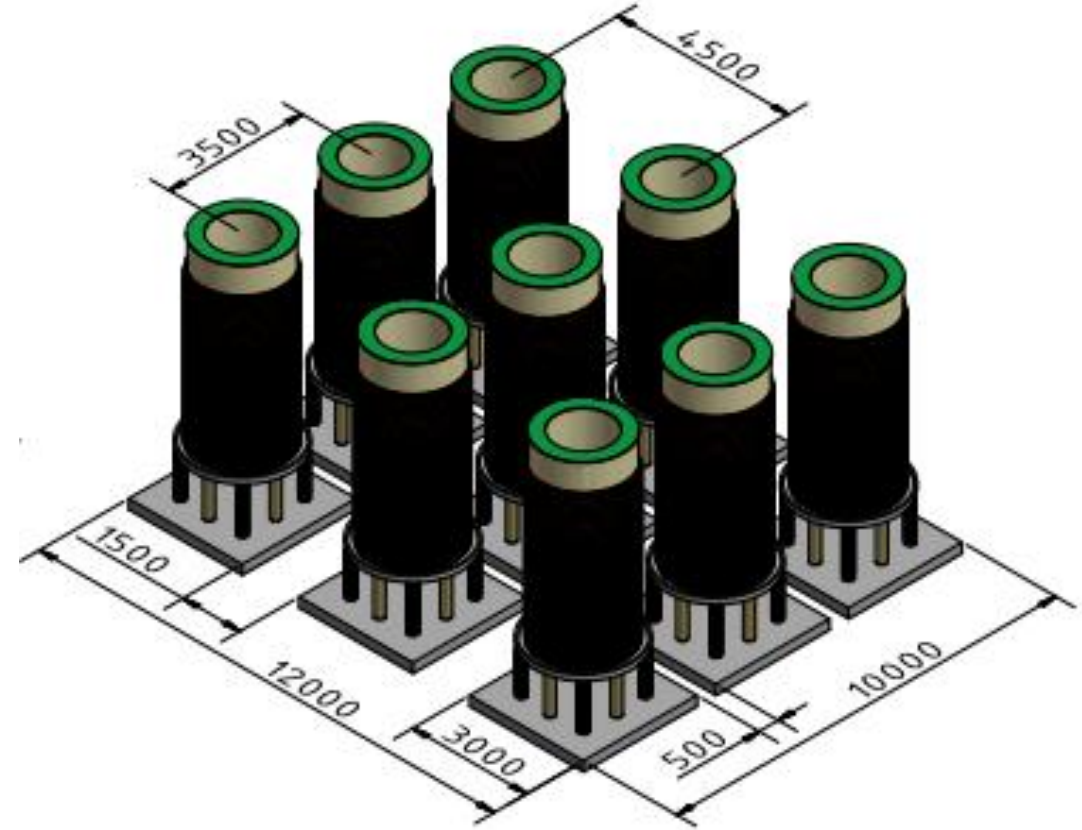
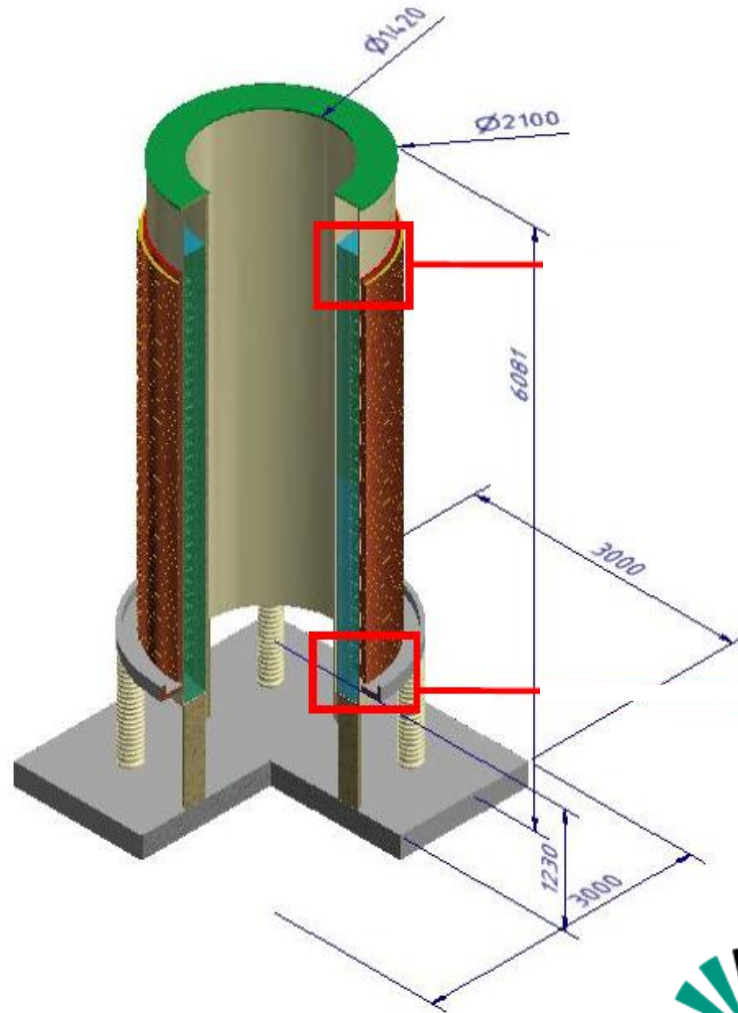
- Ermittlung der Kühlbedarfe: Entsprechend hochskalierter Häufigkeitsverteilungen der Strombelastung je Einsatzort

	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 (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





# konstruktive Umsetzung



# Quickfacts: Kostenpunkte

- Investition:
  - Supraleitermaterial ( $\Sigma \text{€} \sim 50\%$ )
  - Kryostatbehälter
  - MSR (Mess-Steuer-Regeltechnik)
  - Kryokühltechnik
  - Transport
- Betrieb:
  - $\text{LN}_2$  : BE- und Nachfüllung
  - Stromkosten
  - Wartung

# Weiteres Vorgehen

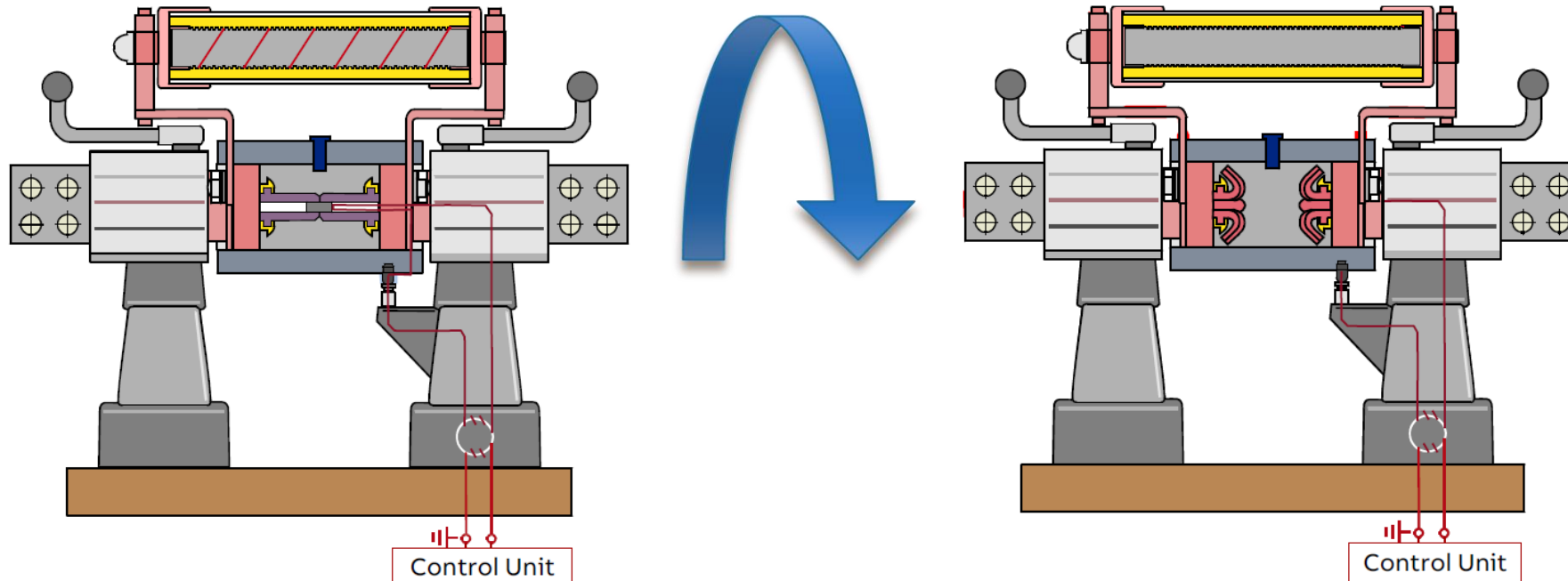
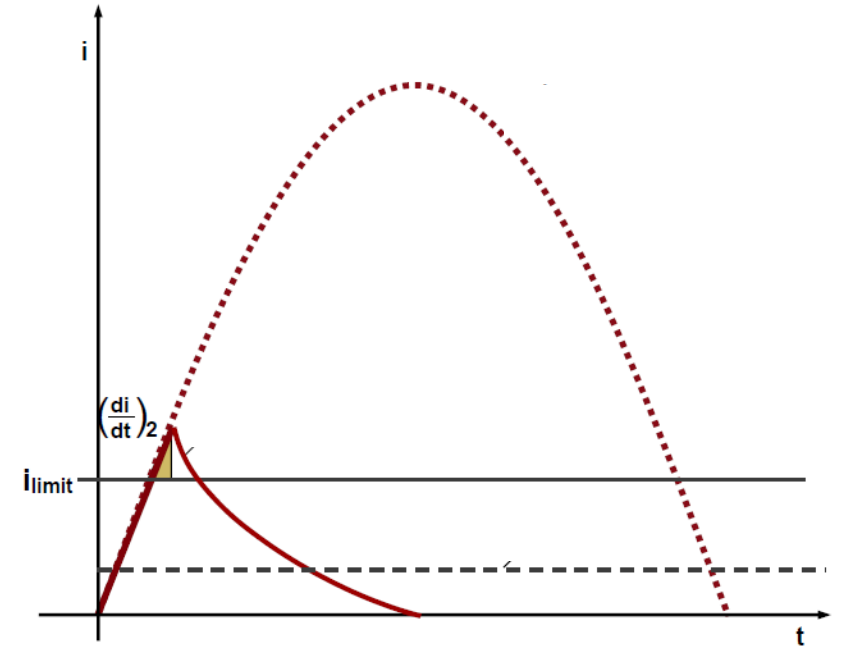
- Je kritischem UW-Standort:
  - Risikoabschätzung: Häufigkeit der Überschreitung
  - Zeitkritikalität: Wann soll der Einsatz erfolgen
  - wirtschaftlicher Vergleich der:
    - operativen und
    - technischen Möglichkeiten
- Technische Alternative: HS-Is-Begrenzer



# 110-kV-Is-Begrenzer

## Alternative zum supraleitenden Kurzschlussstrombegrenzer

- 1) Stromfluss über niederohmigen Hauptstrompfad
- 2) Zündung Sprengladung → Kommutierung auf Sicherung
- 3) über hochohmigen Lichtbogen im Sicherungsgehäuse wird Stromfluss zu Null geführt

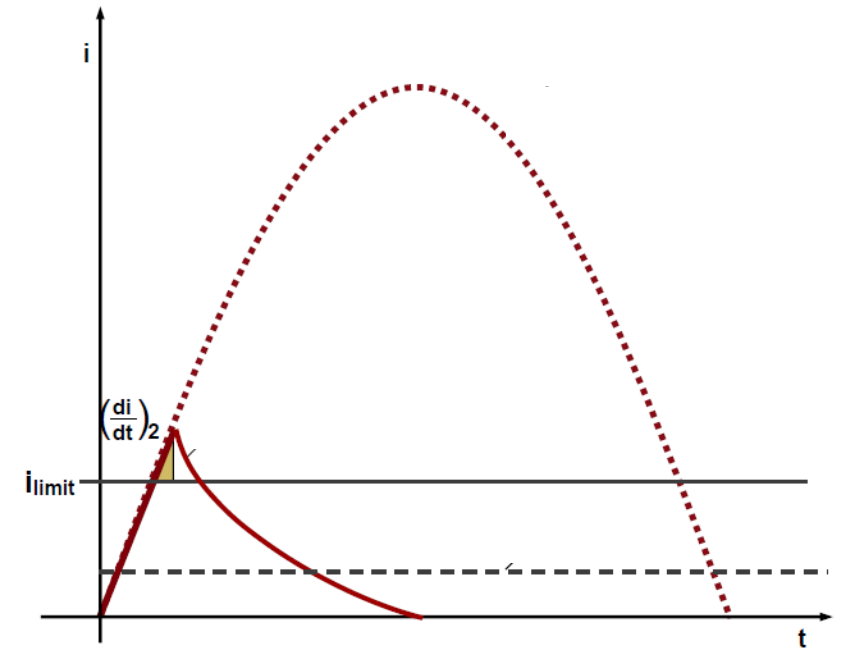
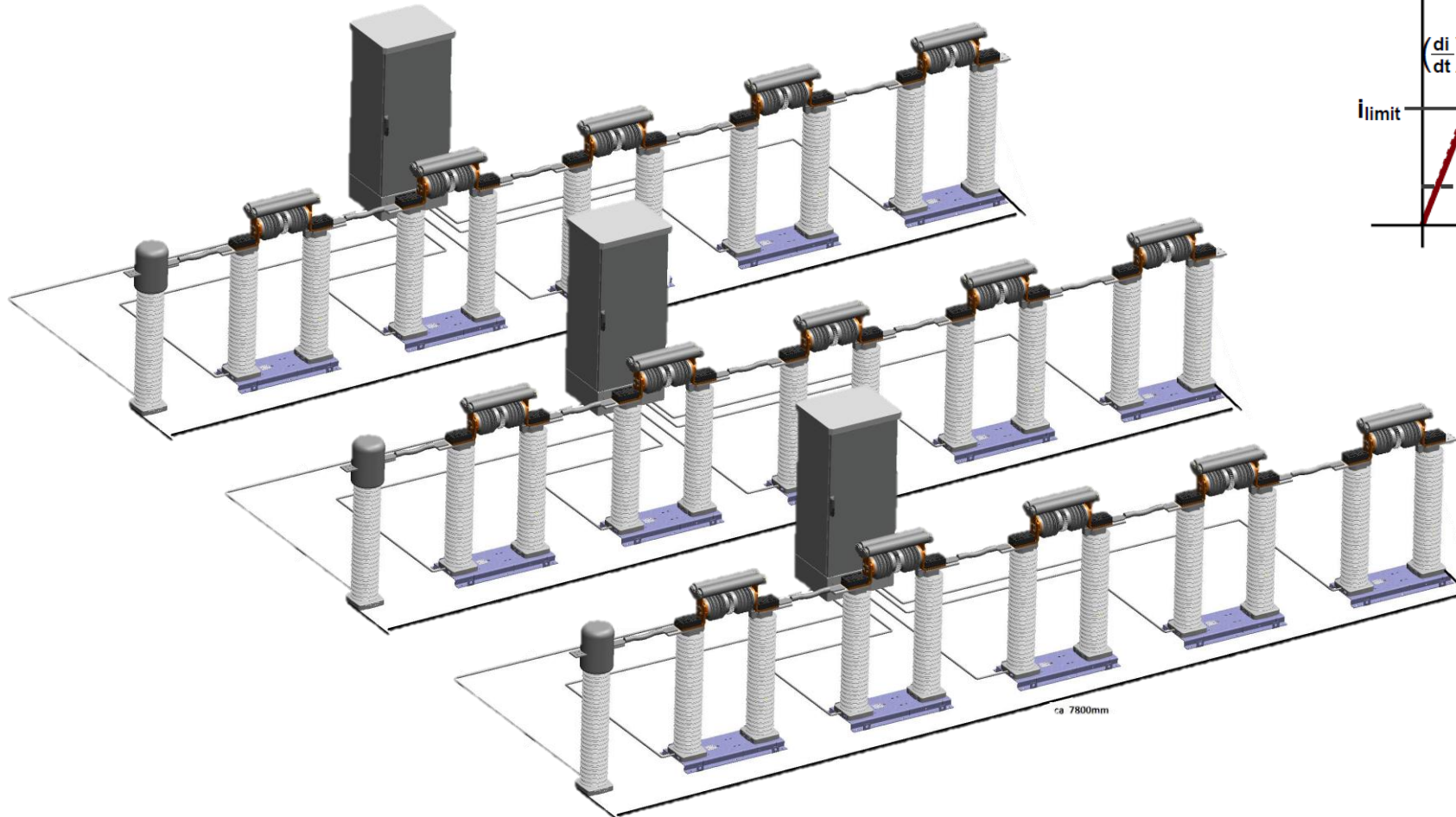


**ABB**

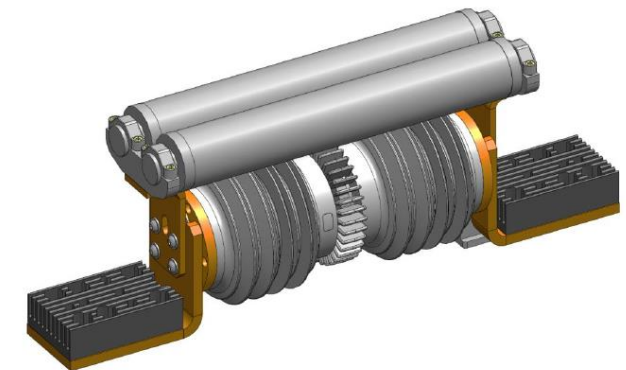
Thüringer  
Energienetze

# 110-kV-Is-Begrenzer

Alternative zum supraleitenden Kurzschlussstrombegrenzer



Freiluft Komponente 24 kV



- Fehlerströme durch den Netzausbau Teil 1/2:

- <https://www.vde-thueringen.de/resource/blob/2181376/f66afacab9b0ee4c61a9a885f219834b/tvi-thueringer-information-2-2022---download-data.pdf>



- Fehlerströme durch den Netzausbau Teil 2/2:

- <https://www.vde-thueringen.de/resource/blob/2213802/9ae20dcefbacd26080da76b66eef5b01/tvi-thueringer-informationen-3-2022-download-data.pdf>



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)