

## Netzschutz und LVRT-Betrieb – Schutzanalyse (nur) mit Lastflussberechnung

Prof. Dr.-Ing. Michael Igel  
Institut für Elektrische Energiesysteme  
Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes  
Saarbrücken



20. Februar 2018 v1.2



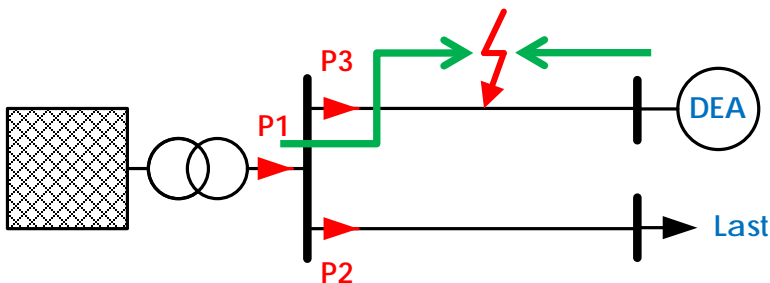
# Designetz - Zuverlässige Erkennung unzulässiger Netzzustände im Kontext der Energiewende

**DESIGNETZ**  
VERBUNDEN MIT KREATIVER ENERGIE

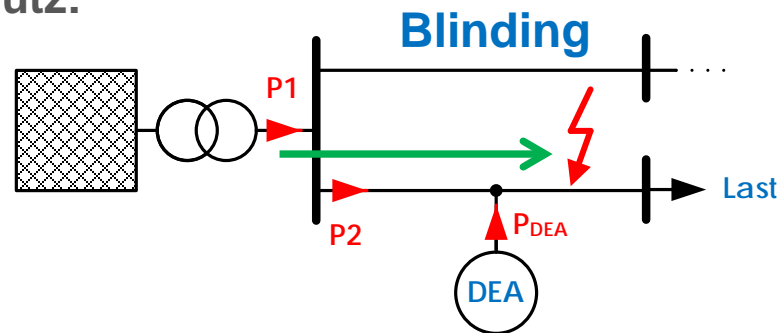


## ➔ Auswirkung des LVRT-Betriebs dezentraler Erzeugungsanlagen (EZA) auf die Selektivität des Distanzschutzes

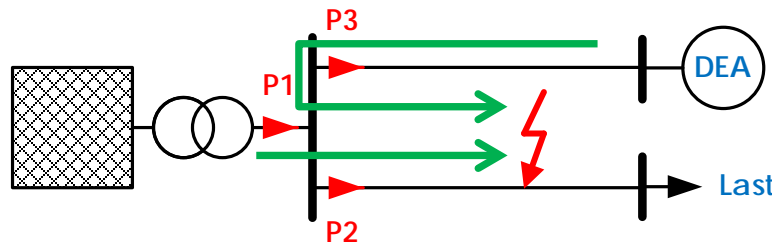
Kritische Szenarien für Haupt- und Reserveschutz:



**Gegeneinspeisung**



**Blinding**



**Zwischeneinspeisung**

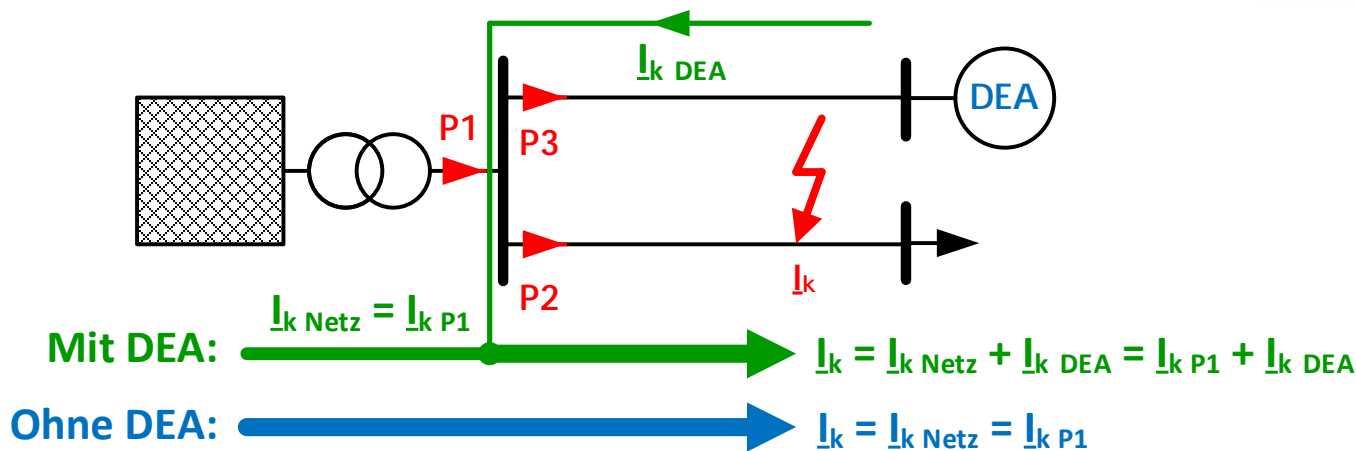
Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



# Designnetz - Zuverlässige Erkennung unzulässiger Netzzustände im Kontext der Energiewende



Distanzschutz	Zwischeneinspeisung
<b>P1</b>	$I_{k P1} < I_k \rightarrow$ <b>Fehlmessung der KS-Impedanz <math>\underline{Z}_{1k}</math></b>
<b>P2</b>	Keine Probleme zu erwarten falls $I_k \gg I_{\text{Last}}$ d.h. ausreichend groß ist
<b>P3</b>	<b>Auswirkung einer DEA-Stromquelle auf Messung KS-Impedanz <math>\underline{Z}_{1k}</math> ?</b>

# Distanzschutz: Reserveschutz A und Zwischeneinspeisung

Distanzschutz A kann Strom  $I_{DEA}$  nicht messen → **Fehlmessung KS-Impedanz**

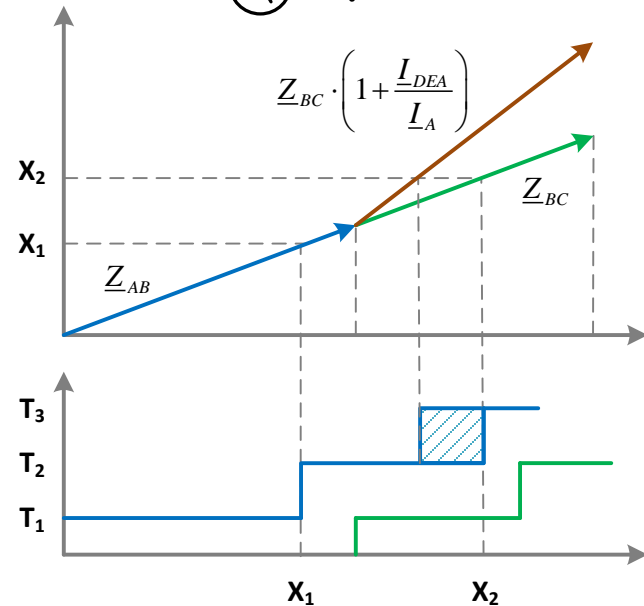
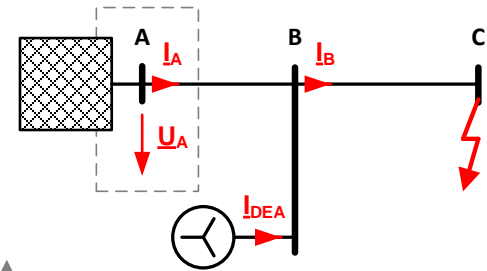
- $Z_{mess} \neq$  Mitimpedanz  $Z_{1k} = Z_{AB} + Z_{BC}$   
 → **Reichweite  $X = \text{Im}(Z_{mess})$  fehlerhaft**

$$\underline{U}_A = \underline{Z}_{AB} \cdot \underline{I}_A + \underline{Z}_{BC} \cdot (\underline{I}_A + \underline{I}_{DEA})$$

$$\underline{Z}_{mess} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A} = \underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} \cdot \frac{\underline{I}_A + \underline{I}_{DEA}}{\underline{I}_A} = \underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} \cdot \left( 1 + \frac{\underline{I}_{DEA}}{\underline{I}_A} \right)$$

**Klassische Maßnahme:**

- **Reichweite  $X$  der Impedanzzone anpassen**



# LVRT-Betrieb einer dezentralen Erzeugungsanlage

nach VDE-AR-N 4110:2017-03 (Entwurf)

## Was ist der LVRT-Betrieb (Low Voltage Ride Through)?

- Betrieb einer Erzeugungsanlage (EZA) bei Netzfehlern d.h. auch im Kurzschlussfall  
 „Ziel der dynamischen Netzstützung ist ... eine ungewollte Abschaltung von Erzeugungsleistung und damit eine Gefährdung der Netzstabilität zu verhindern.“
- Maßnahme: Einspeisung von **Blindstrom  $I_b$**  zur Spannungsstützung
- Frage: Warum keine ähnliche Vorgabe zum **Wirkstrom  $I_w$**  ?

## Die übliche Abschätzung des Spannungsfalls in Stromnetzen

Spannungsfall  $\Delta U \approx R \cdot I_w + X \cdot I_b$   $\xrightarrow{\Delta U \stackrel{!}{=} 0}$   $I_b = -\frac{R}{X} \cdot I_w$

## LVRT-Betrieb einer dezentralen Erzeugungsanlage nach VDE-AR-N 4110:2017-03 (Entwurf)

### Spannungsstützung durch Blindstromeinspeisung bei Netzfehlern

- Für symmetrische und unsymmetrische Fehler → **3p(E)- und 2p-Netzfehler**
  - Blindstromeinspeisung im **Mitsystem  $\underline{I}_1$**  und **Gegensystem  $\underline{I}_2$**
1. Blindstromeinspeisung oder –bezug  $I_{1b(0)}$  und  $I_{2b(0)}$  im Normalbetrieb  
➔ **Übererregter (+)** oder **untererregter Betrieb (-)** im Vorzeichen unterscheiden
  2. Spannungseinbruch  $\Delta u_{1,2}$  in Mit- und Gegensystem nach Fehlereintritt ermitteln
  3. Blindstromänderung in Mit- und Gegensystem  $\Delta i_{1,2}$  berechnen
  4. Blindstromeinspeisung oder –bezug  $I_{1b}$  und  $I_{2b}$  im Netzfehlerbetrieb

$$I_{1b,2b} = \pm I_{1b(0),2b(0)} + \Delta i_{1,2} = \pm I_{1b(0),2b(0)} + k \cdot \Delta u_{1,2}$$

➔ **Blindstromstatik  $k$  = Freiheitsgrad des Netzbetreibers**

## EZA-Modell einer Drehstromquelle im LVRT-Betrieb

### Rücktransformation **012-System** in das **Drehstromsystem** (L123)

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \underline{I}_1 = I_1 \cdot e^{j\varphi_{I1}} \quad \underline{I}_2 = I_2 \cdot e^{j\varphi_{I2}} \quad \underline{I}_0 = I_0 \cdot e^{j\varphi_{I0}}$$

### ➔ Transformation von komplexen Vektoren

- Nach VDE-AR-N-4110 für den LVRT-Betrieb: **Keine Nullstromeinspeisung**


$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= I_{1w} + j \cdot I_{1b} \\ \underline{I}_2 &= I_{2w} + j \cdot I_{2b} \\ \underline{I}_0 &= 0 \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{pmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ I_{1w} + j \cdot I_{1b} \\ I_{2w} + j \cdot I_{2b} \end{pmatrix}$$

## EZA-Modell einer Drehstromquelle im LVRT-Betrieb

$$\underline{I}_{L1} = (\underline{I}_{1w} + \underline{I}_{2w}) + j \cdot (I_{1b(0)} + I_{2b(0)} + k \cdot (\Delta u_1 + \Delta u_2))$$

- Annahme: **Symmetrisches Drehstromsystem im Normalbetrieb**

$$\underline{I}_{2b(0)} = 0 \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_{L1} = \underline{I}_w + j \cdot (I_{1b(0)} + k \cdot (\Delta u_1 + \Delta u_2))$$

- Es verbleibt der **Wirkstrom  $I_w$**  als **Freiheitsgrad für den EZA-Betreiber**
  - Begrenzung durch maximal zulässigen **Scheinstrom  $I_{\max}$**
  - VDE-AR-N-4110: Keine Vorgabe für **Wirkstrom  $I_w$**  (erkennbar)
-  **Wirkstrom  $I_w$**  kann im LVRT-Betrieb frei gewählt werden

$$0 \leq I_w \leq \sqrt{I_{\max}^2 - (I_{1b(0)} + k \cdot (\Delta u_1 + \Delta u_2))^2}$$



# Schutzanalyse (nur) mit Lastflussberechnung

## Ziel: Untersuchung der Selektivität des Distanzschutzes

### 1. Lastflussberechnung im Normalbetrieb

Berechnung eingespeister oder bezogener **Blindstrom**  $I_{b(0)}$  am NAP der EZA

➡ **Übererregter (+) oder untererregter (-) Betrieb**

### 2. Erweiterte Lastflussberechnung im Kurzschlussfall (LVRT-Betrieb)

- **Kurzschluss 1pE/2p/2pE/3p/3pE** ins Stromnetz einfügen
- Berechnung der **Blindstromänderung**  $\Delta i_{1,2} = k \cdot \Delta u_{1,2}$  (012-System)
- Berechnung der resultierenden **Blindströme**  $I_{bL123}$  nach VDE-AR-N 4110

➡ Festlegung des eingespeisten **Wirkstromes**  $I_{wL123}$

- Berechnung der komplexen Leiterströme  $I_{L123} = I_{wL123} + j \cdot I_{bL123}$

**Keine Iteration der eingespeisten Scheinleistung, nur des Verschiebungsfaktors**

# Schutzanalyse (nur) mit Lastflussberechnung

## Untersuchung der Selektivität des Distanzschutzes für eine Zwischeneinspeisung

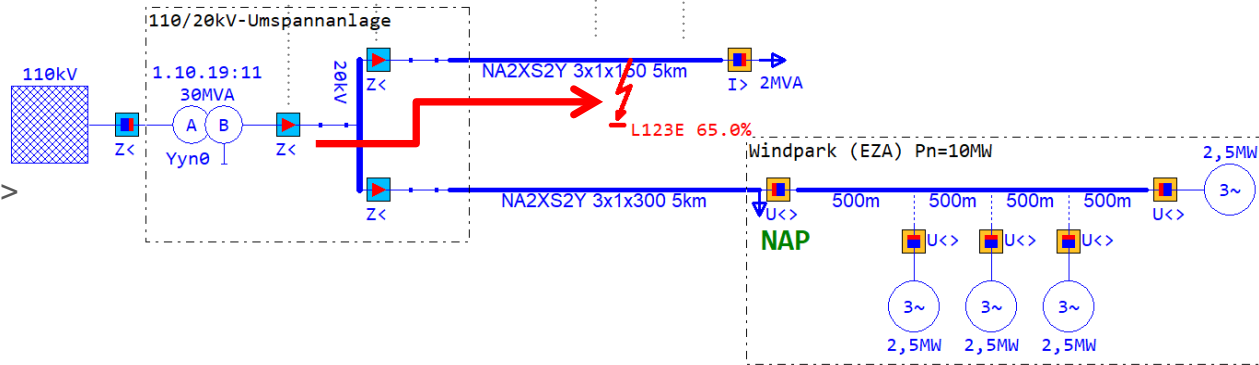
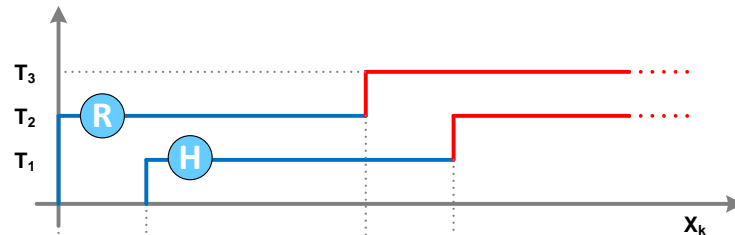
**R** Reserveschutz

**H** Hauptschutz

Distanzschutz Z<

Überstromzeitschutz I>

Unter-/Überspannungsschutz U<>



### Referenznetz

- Selektivschutz durch **2 Impedanzzonen** je Distanzschutz Z<
- Ermittlung der **Einstellwerte ohne Berücksichtigung der EZA**
- **Staffelfaktor  $f_s = 85\%$**  für die polygonale Impedanzzone

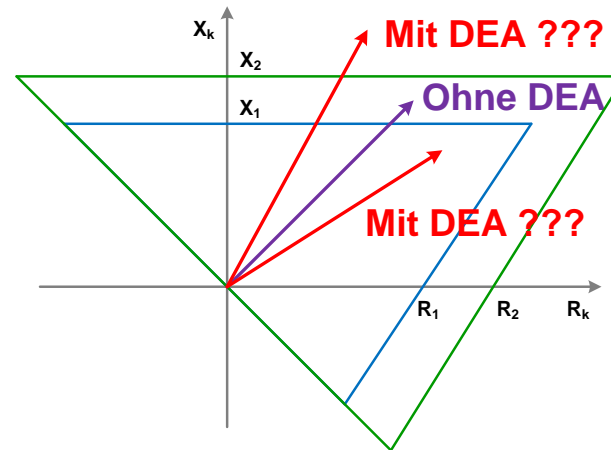
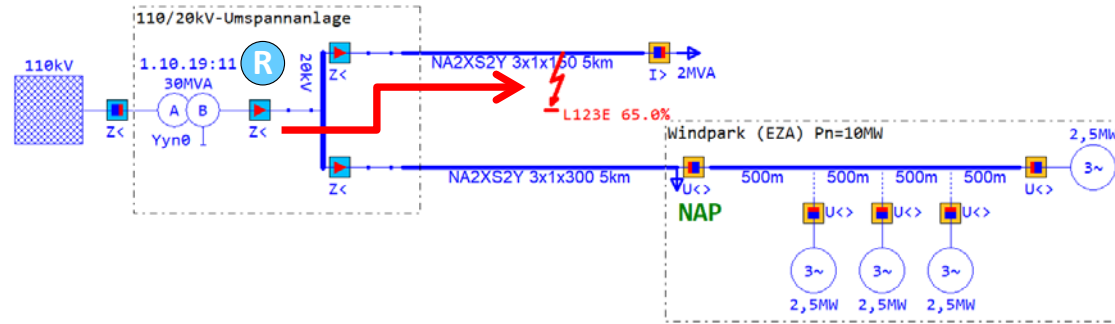
# Schutzanalyse (nur) mit Lastflussberechnung

## Untersuchung der Selektivität des Distanzschutzes für eine Zwischeneinspeisung

- Reserveschutz **R** kann KS-Strom der EZA nicht einmessen
- KS-Impedanz  $\underline{Z}_{1k}$  wird fehlerhaft eingemessen
- KS-Klärung erfolgt nicht entfernungsselektiv

➔ Selektivität ist abhängig von

- Blindstromstatik  $k$  (➔  $I_b$ )
- Wirkstrom  $I_w$

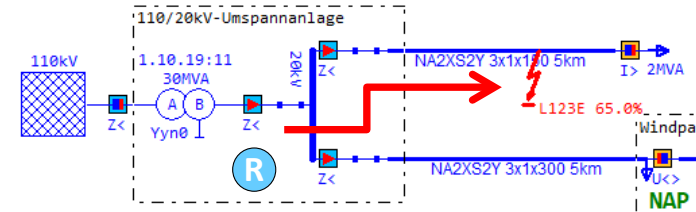


# Schutzanalyse (nur) mit Lastflussberechnung

## Untersuchung der Selektivität des Distanzschutzes (Reserveschutz) für eine Zwischeneinspeisung

### Vorgehensweise

- Kurzschlussort 0..100% der Leitungslänge
- LVRT-Betrieb: keine Einspeisung ins Gegensystem  $\rightarrow I_2 = 0$
- Berechnung der **KS-Impedanz  $\underline{Z}_{1k}$**  im Mitsystem



$$I_w = \sqrt{I_{\max}^2 - \left( I_{1b(0)} + k \cdot \Delta u_1 \right)^2} \text{ mit } \Delta u_2 \stackrel{!}{=} 0 \leftarrow$$

**Szenario 1:** Referenznetz ohne EZA

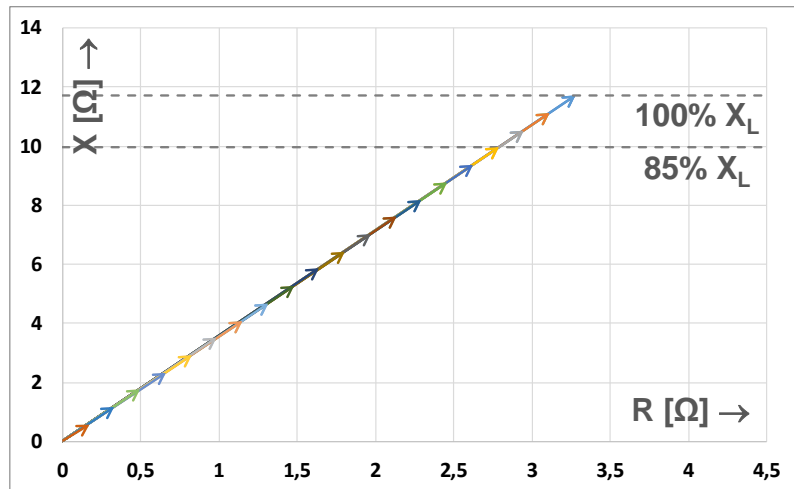
**Szenario 2:** Referenznetz mit EZA und  $\cos \varphi = 0 \rightarrow I_w = 0A$

**Szenario 3:** Referenznetz mit EZA und maximalem Wirkstrom  $I_w$

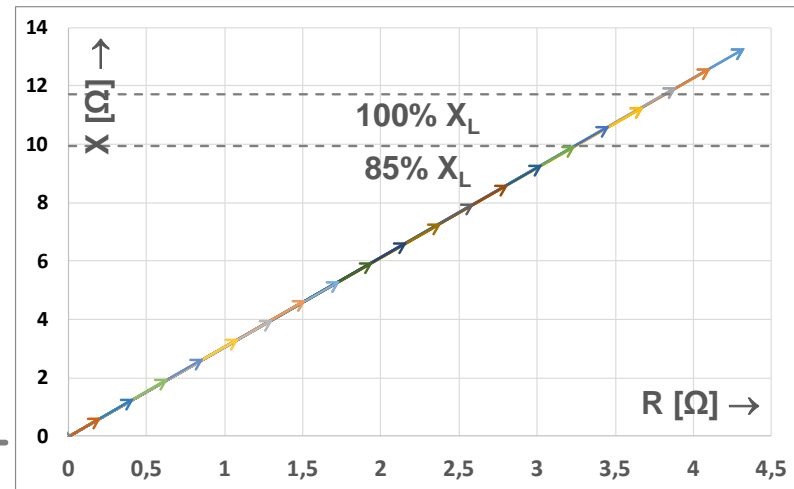
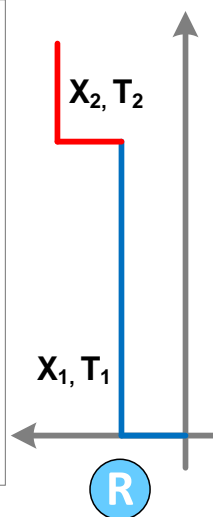
**Wirkstrom  $I_w$  stützt die Netzspannung im KS-Fall**

# Reserveschutz P1: Mitimpedanz $\underline{Z}_{1k}$ beim 3pE-Kurzschluss

## Szenario 1: ohne EZA



## Szenario 2: mit EZA und $\cos \varphi = 0$



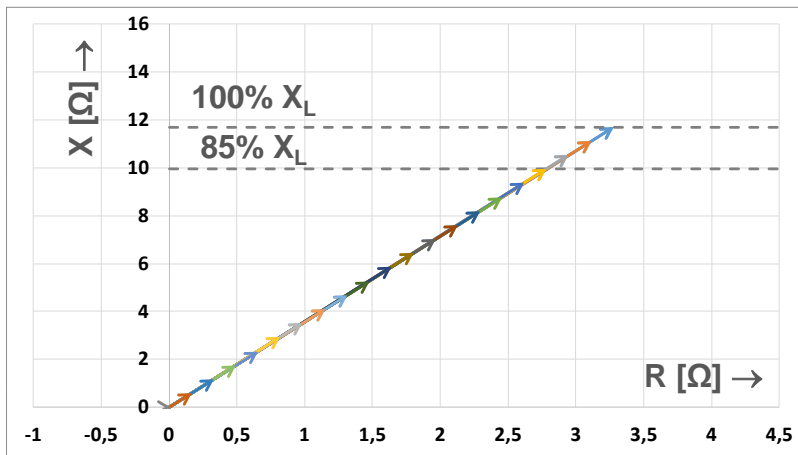
## KS-Impedanz $\underline{Z}_{1k}$ für Szenario 2

- KS-Impedanz  $\underline{Z}_{1k}$  wird um ca. 15% zu groß eingemessen
- Impedanzwinkel  $\varphi_{Z_{1k}}$  bleibt näherungsweise konstant
- Hauptschutzzone  $X_1 = 85\% X_L$  wird durch Zwischeneinspeisung auf ca. 75% verkürzt

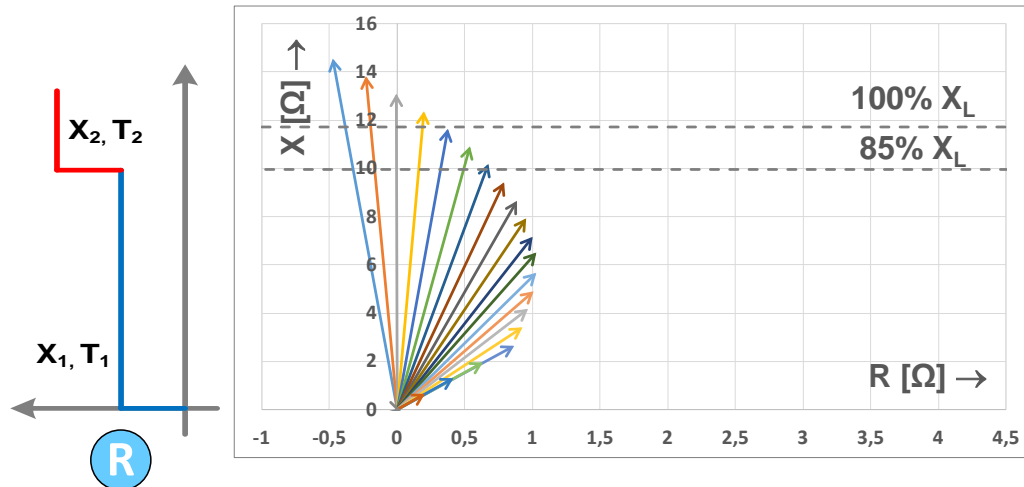
➔ **Hauptschutzzone  $X_1$  und „Lichtbogenreserve“  $R_1$  ggfs. anpassen**

# Reserveschutz P1: Mitimpedanz $\underline{Z}_{1k}$ beim 3pE-Kurzschluss

## Szenario 1: ohne EZA



## Szenario 3: mit EZA und Wirkstrom $I_w$

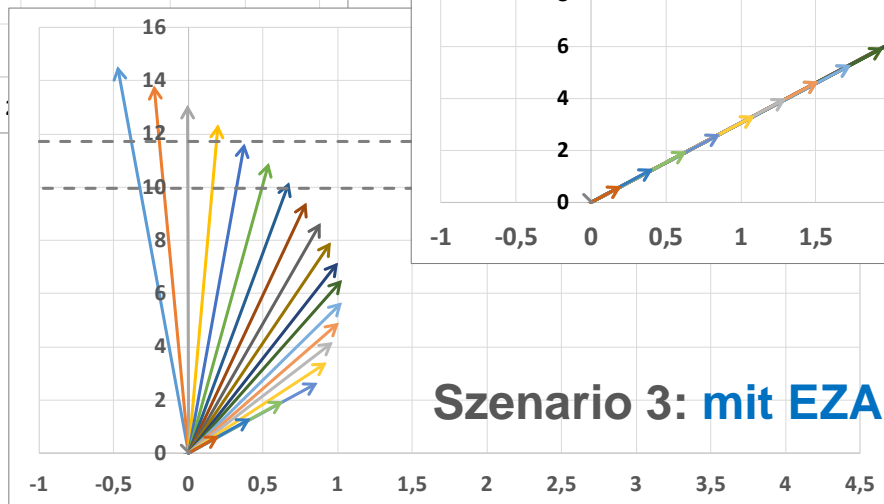
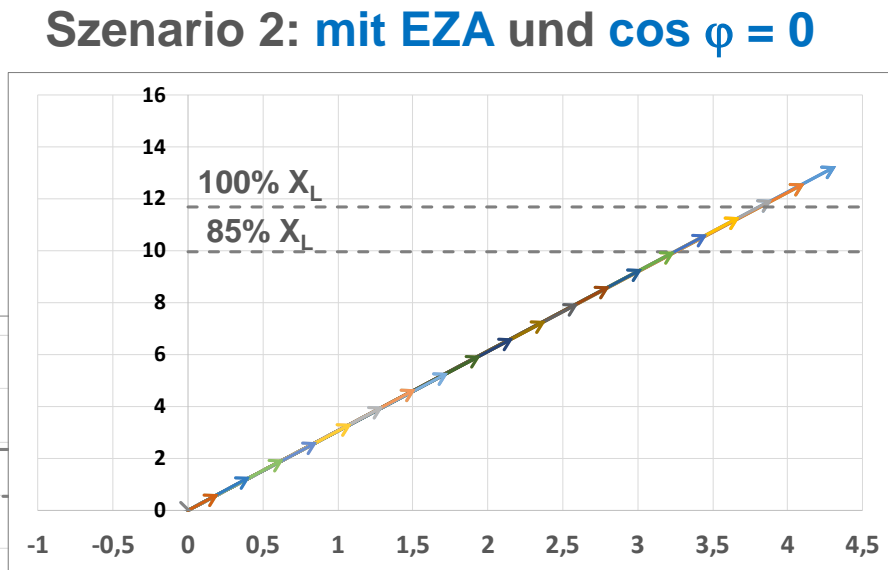
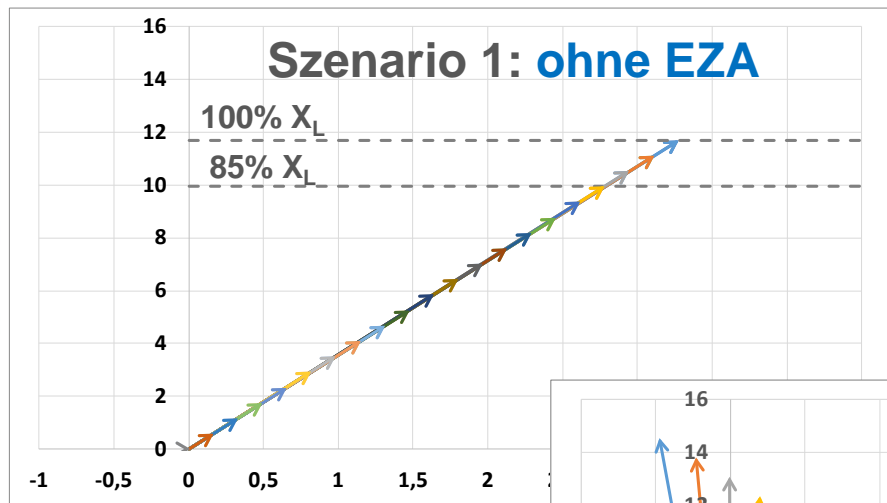


## KS-Impedanz $\underline{Z}_{1k}$ für Szenario 3

- Fehlerort  $\leq 25\%$ : Wirkstrom  $I_w \approx 0 \Rightarrow \varphi_{Z_{1k}} \approx \text{konst.}$
- Fehlerort  $> 25\%$ : Wirkstrom  $I_w > 0 \Rightarrow \varphi_{Z_{1k}}$  dreht nach links  $\Rightarrow$  Richtungsgerade ?
- KS-Impedanz  $\underline{Z}_{1k}$  wird um ca. 25% zu groß eingemessen

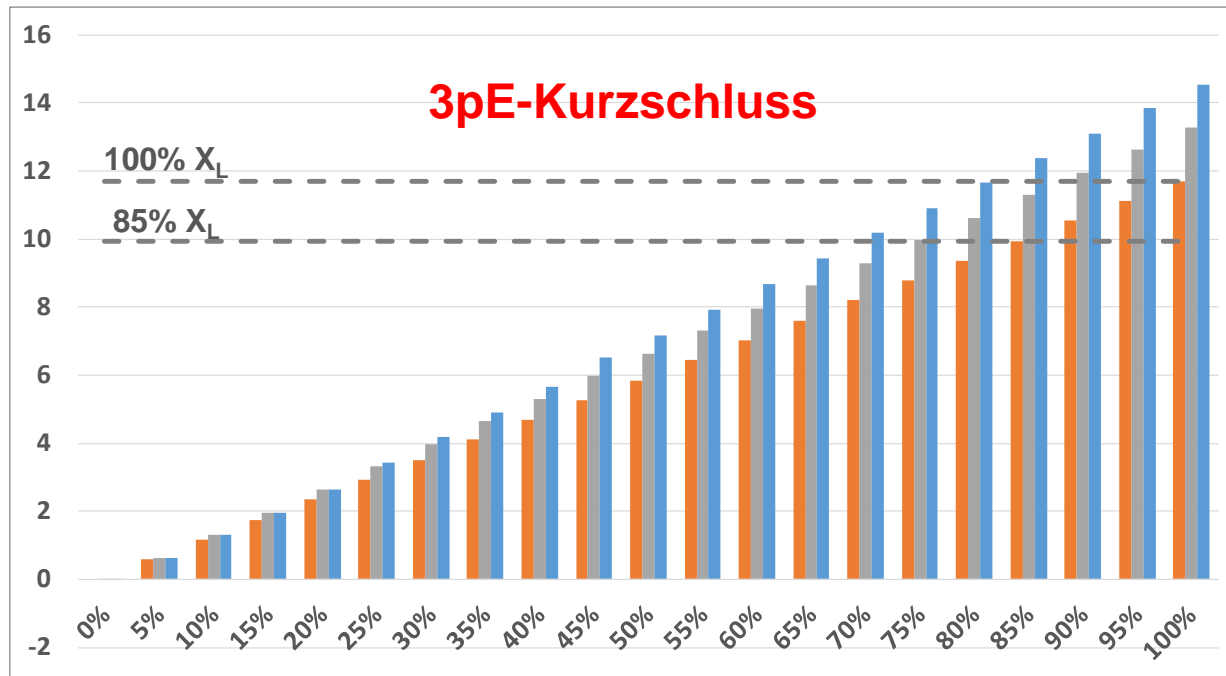
 **Hauptschutzzone  $X_1$  und Richtungsgerade ggfs. anpassen**

# Reserveschutz P1: Mitimpedanz $\underline{Z}_{1k}$ beim 3pE-Kurzschluss



**Einfluss der Wirkstrom-  
einspeisung  $I_w$  auf die  
Mitimpedanz  $\underline{Z}_{1k}$**

# Reserveschutz P1: Mitimpedanz $\underline{Z}_{1k}$ beim 3pE-Kurzschluss



**Szenario 1: ohne EZA**

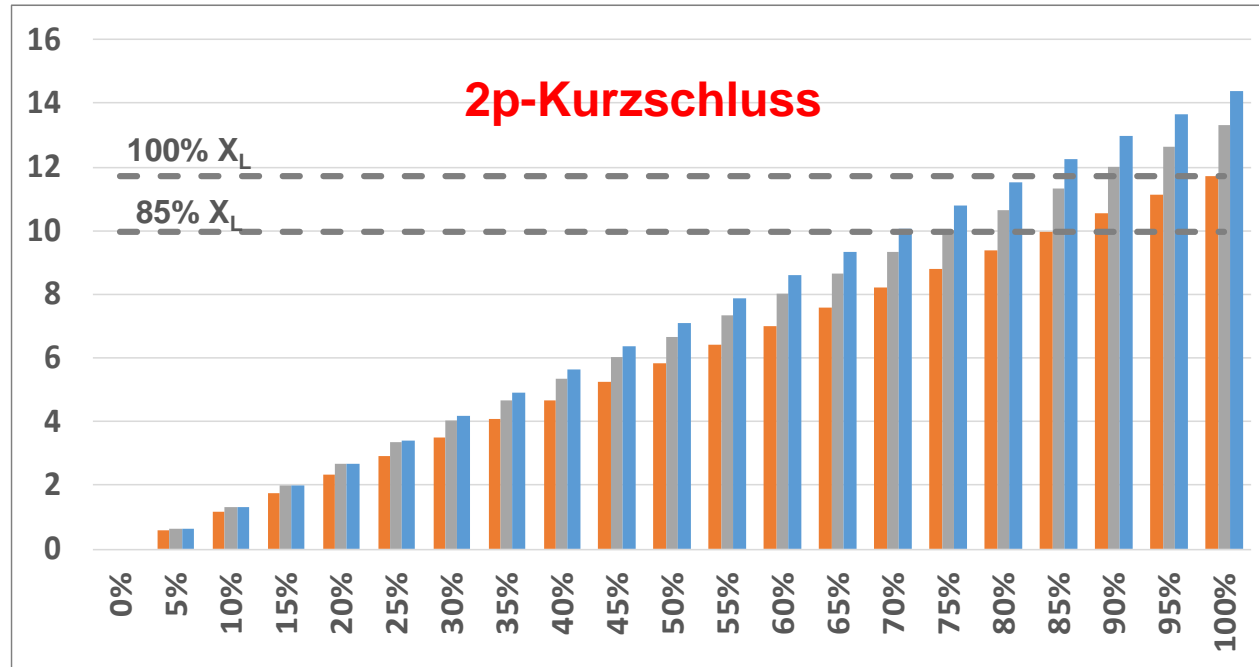
**Szenario 2: mit EZA  
und  $\cos \varphi = 0$**

**Szenario 3: mit EZA  
und Wirkstrom  $I_w$**

- Zwischeneinspeisung verkürzt die Reichweite der Hauptschutzzone
- Zusätzlicher Wirkstrom stützt die Netzspannung, verkürzt zusätzlich die Reichweite

➔ **Kompensation durch Anpassung der Hauptschutzzone möglich**



Reserveschutz P1: Mitimpedanz  $\underline{Z}_{1k}$  beim 2p-Kurzschluss

**Szenario 1: ohne EZA**

**Szenario 2: mit EZA  
und  $\cos \varphi = 0$**

**Szenario 3: mit EZA  
und Wirkstrom  $I_w$**

- Zwischeneinspeisung verkürzt die Reichweite der Hauptschutzzone
- Zusätzlicher Wirkstrom stützt die Netzspannung, verkürzt zusätzlich die Reichweite

➔ **Kompensation durch Anpassung der Hauptschutzzone möglich**

Korrekte Messung der KS-Reaktanz durch einen Distanzschutz bei Zwischeneinspeisung mit Netzstromrichtern siehe Vortrag zu Schutz- und Leittechnik 2016, Februar 2016

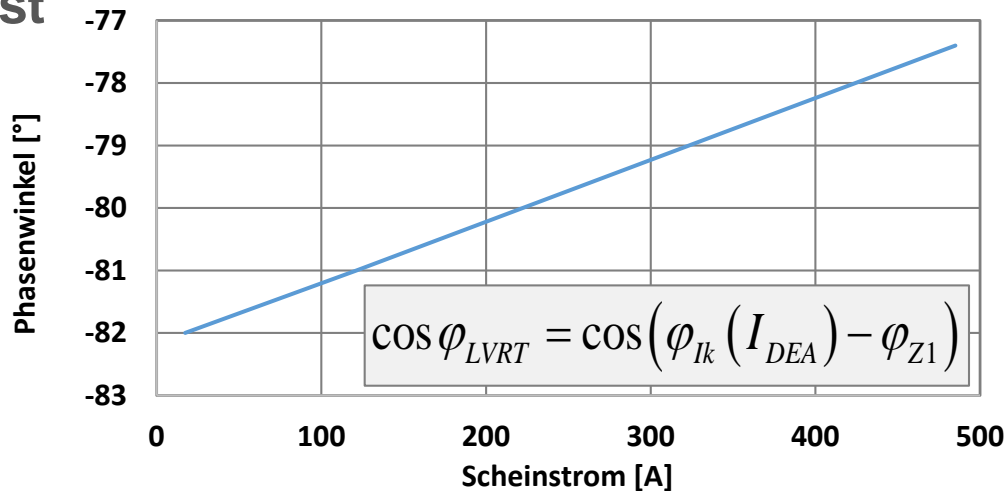
**LVRT-Betrieb: Verschiebungsfaktor  $\cos \varphi_{LVRT}$  abhängig vom Betrag des Scheinstromes**

- Blindstrom  $I_b$  nach VDE-AR-N 4110
- Wirkstrom  $I_w$  wird eingespeist
- ➔ **stützt Netzspannung**
- Reaktanz  $X_{1k}$  korrekt
- Resistanz  $R_{1k}$  zu groß

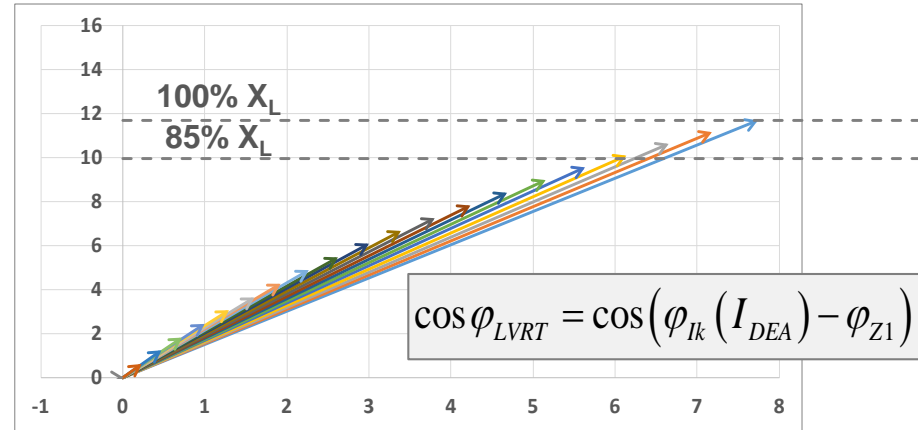
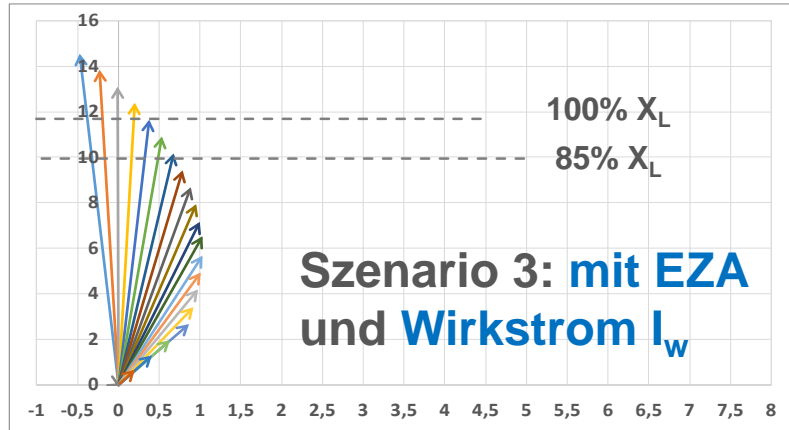
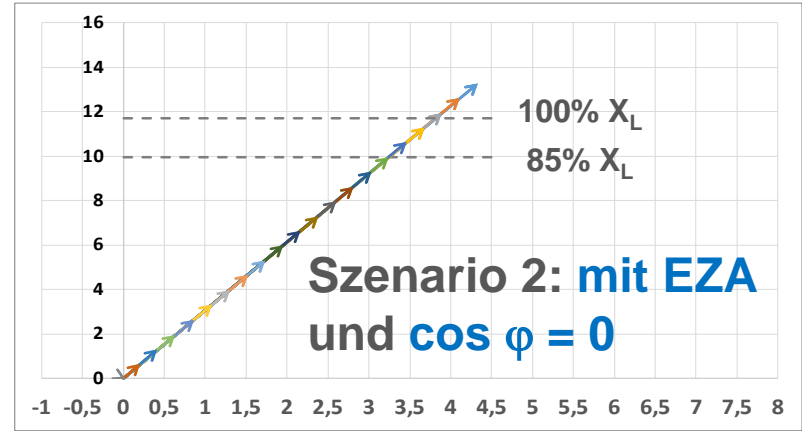
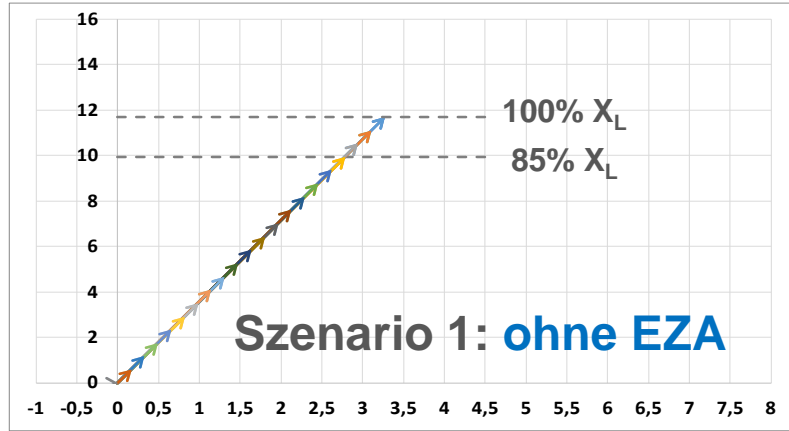
➔ **Kompensation durch größere Lichtbogenreserve**

$$\underline{I}_{L1} = I_w + j \cdot \left( I_{1b(0)} + k \cdot (\Delta u_1 + \Delta u_2) \right)$$

$$I_w = f(I_{max}, I_b, \cos \varphi_{LVRT})$$



# Reserveschutz P1: Mitimpedanz $\underline{Z}_{1k}$ beim 3pE-Kurzschluss



# Netzschutz und LVRT-Betrieb – Schutzanalyse (nur) mit Lastflussberechnung

## Zusammenfassung und nächste Schritte

- EZA-Einspeisung im LVRT-Betrieb in VDE-AR-N 4110 ist nicht eindeutig
  - Wirkstromeinspeisung  $I_w$  wirkt spannungsstützend
  - Beste Ergebnisse bietet das  $\cos \varphi_{LVRT}$  – Verfahren

→ Ergebnis: Mitimpedanz  $\underline{Z}_{1k}$  wird erheblich von EZA-Verhalten beeinflusst
- Anpassung der Impedanzzone an „reales“ LVRT-Verhalten der EZA erforderlich  
→ Eigenschaften ermitteln durch erweiterte Lastflussberechnung
- Nächster Schritt: Validierung der Berechnungsergebnisse für  $\underline{Z}_{1k}$  im Labor
  - Sekundärprüfeinrichtung und „reales“ Distanzschutzgerät
  - Berechnung der zeitlichen Signale  $u_{L123}(t)$  und  $i_{L123}(t)$
  - Einsatz eines EZA-Modells für netzdynamische Ausgleichsvorgänge
  - Ermittlung mit den Kurzschlussmesswerten des Gerätes