

# ■ Problemstellungen bei Auslegungsberechnungen für Eigenbedarfsnetze von Kraftwerken

*vorgetragen von*

*Dr.-Ing. Klaus Pfeiffer*

*Brandenburgische Technische Universität Cottbus*

*Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik*

*Walther-Pauer-Straße 5*

*03046 Cottbus*

*klaus.pfeiffer@tu-cottbus.de*

**Cerberus-Anwendertreffen  
Chemnitz, den 24.04.2008**

# Gliederung

---

- **Vorstellung Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik**
- **Auslegungsberechnungen**
- **Beanspruchungen**
- **Grundlegende Zusammenhänge bei der Planung**

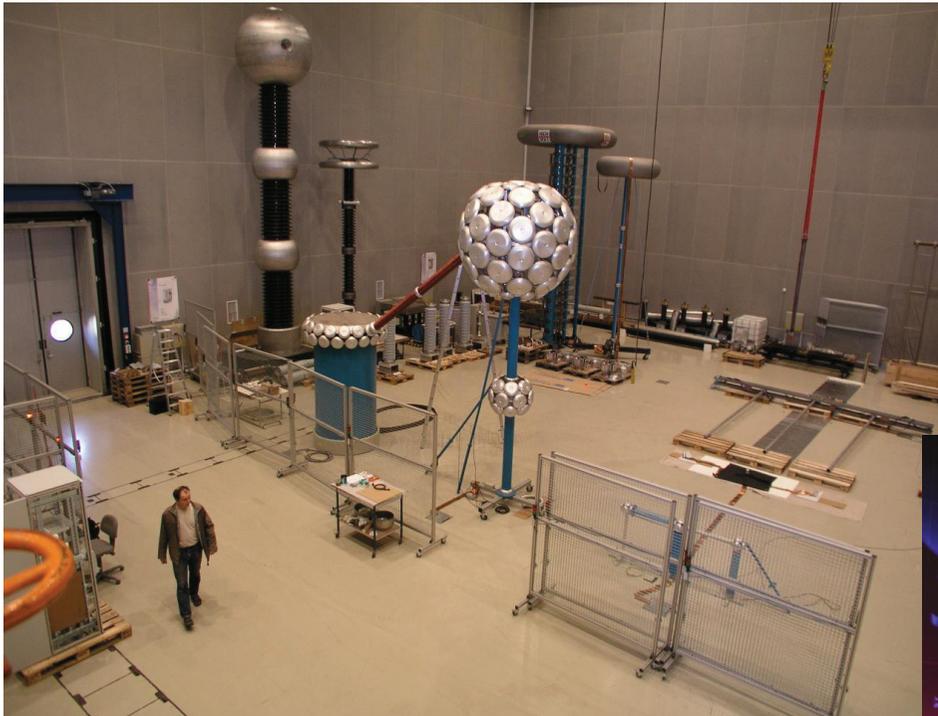
# Vorstellung Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik

- **Lehrstuhlinhaber:** Prof. Dr.-Ing. Harald Schwarz
- **Gründung:** 1995
- **Mitarbeiter** ca. 10 wissenschaftliche Mitarbeiter  
3 Techniker
- **Drittmittelvolumen:** ca. 700.000 EUR/Jahr
- **Arbeitsgebiete**
  - Elektromagnetische Verträglichkeit
  - Hochspannungsprüfungen
  - Netzintegration von EEG-Anlagen
  - Transformatormonitoring
  - Auslegungsberechnungen
  - Optimierte Gestaltung von Kraftwerkseigenbedarfsversorgungen

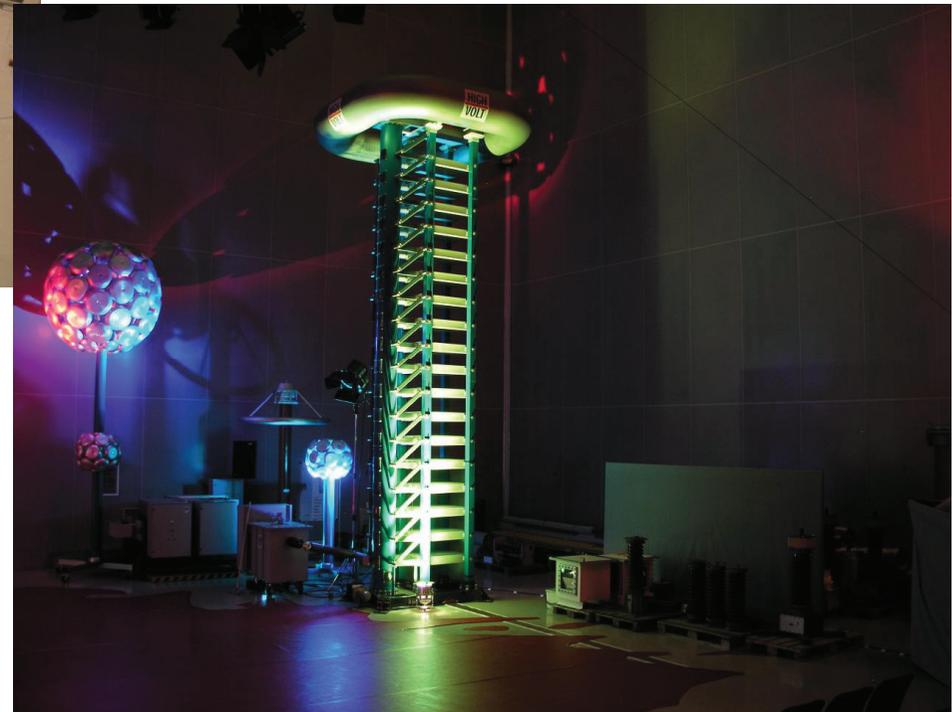
# Hochspannungshalle der BTU Cottbus



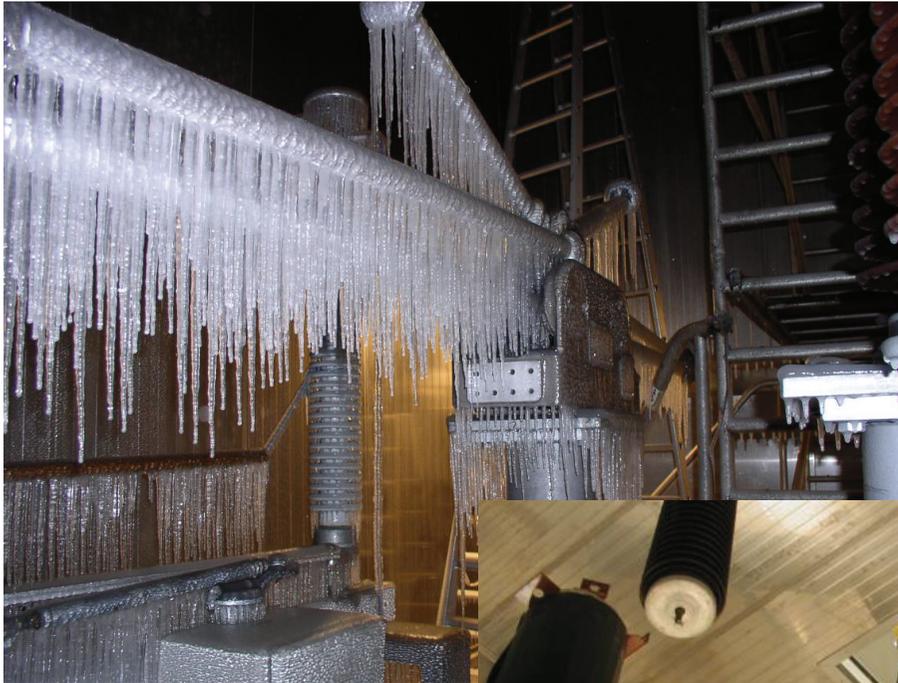
# Hochspannungshalle der BTU Cottbus



**Stoßspannungsgenerator  
1800 kV**



# Hochspannungshalle der BTU Cottbus



## ■ Klimakammer

### Abmessungen

7 x 5 x 8 m (Länge x Breite x Höhe)

### Temperaturbereich

-50 (-60) ... + 80 °C

### Luftfeuchtebereich

10...95 %

### Prüfspannung

360 kV

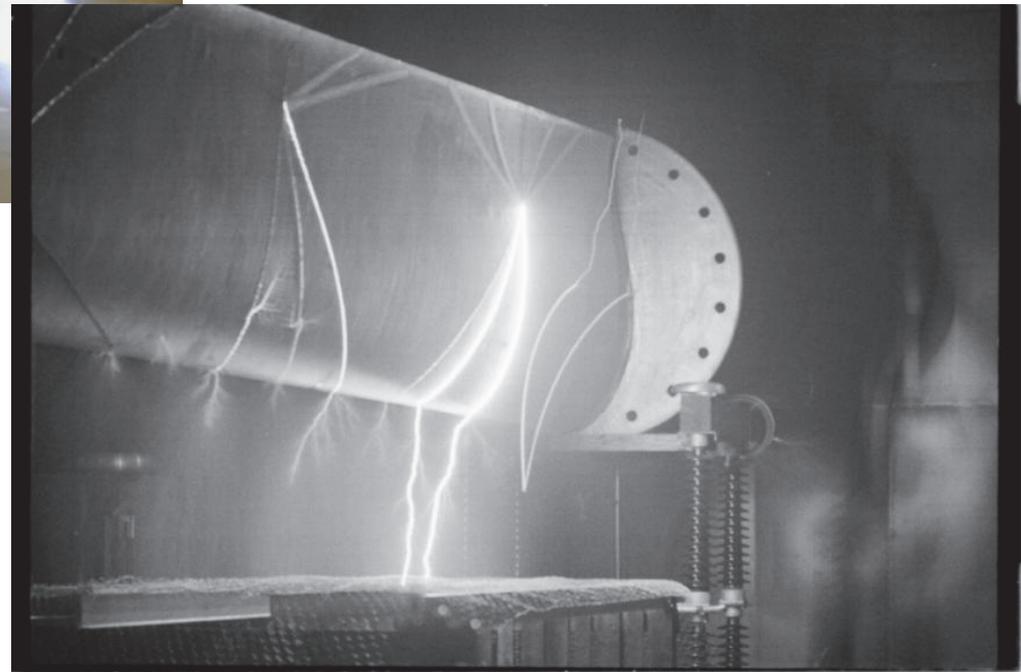
### Prüfstrom

20 kA

# Projektarbeit



## Blitzstoßspannungsprüfungen an Rotorblättern von WEA



# Projektarbeit

## EMV-Prüfgenerator für Schienenfahrzeuge



- Vorstellung Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik
- **Auslegungsberechnungen**
- Beanspruchungen
- Grundlegende Zusammenhänge bei der Planung

# Auslegungsberechnungen

---

- **Berechnung der maximalen Kurzschlussströme**
- **Berechnung der minimalen Kurzschlussströme**
- **Berechnung des Anlaufs von Motoren großer Bemessungsleistung**
- **Kabelauslegungsberechnungen**
- **Selektivschutzkonzeption und Ermittlung der Schutzeinstellwerte**

# Auslegungsberechnungen

## ▪ Zielstellungen

	Benötigte Kurzschlussströme
Festlegung der Schaltanlagenparameter	maximale $I_k$
Festlegung der Schaltgeräteparameter	maximale $I_k$
Festlegung der mindestens erforderlichen Leiterquerschnitte der Kabel <sup>1)</sup>	maximale $I_k$ und minimale $I_k$
Ermittlung der Einstellwerte der Schutzeinrichtungen	minimale $I_k$

<sup>1)</sup> bei Erfüllung der technischen Auswahlkriterien

# Auslegungsberechnungen

## ▪ Kurzschlussstromberechnung

Berechnungsverfahren nach VDE 0102:2002-07 / DIN EN 60909-0

Vorgängernorm:

DIN VDE 0102 / VDE 0102:1990-01 (Anwendung bis 01.01.2003 erlaubt)

Änderungen gegenüber der Vorgängernorm:

- Spannungsfaktoren  $c$
- Korrektur der Transformatorimpedanzen (Korrekturfaktor  $k_T$ )

Festlegungen in VDE 0102:2002-07

- Kurzschlusseintritt im Spannungsnulldurchgang
- keine Vorbelastungen
- keine Berücksichtigung der Transformatorstufung
- keine Berücksichtigung der Erregung

# Auslegungsberechnungen

- Bedingungen für maximale und minimale Kurzschlussströme (1)  
(VDE-Bezeichnung: größte und kleinste Kurzschlussströme)

	Maximale Kurzschlussströme	Minimale Kurzschlussströme
<b>Schaltzustand des Netzes</b>  - Kupplungen - Parallele Leitungen	<b>EIN</b>  <b>ja</b>	<b>AUS</b>  <b>nein</b>
<b>Einspeisungen</b>  - KW-Einsatz - Anzahl der Einspeisetrafos - Notstromgeneratoren	<b>MAX</b>  <b>MAX</b>  <b>ja (zusätzlich)</b>	<b>MIN</b>  <b>MIN</b>  <b>ja (nur Notstrom)</b>

# Auslegungsberechnungen

- Bedingungen für maximale und minimale Kurzschlussströme (2)

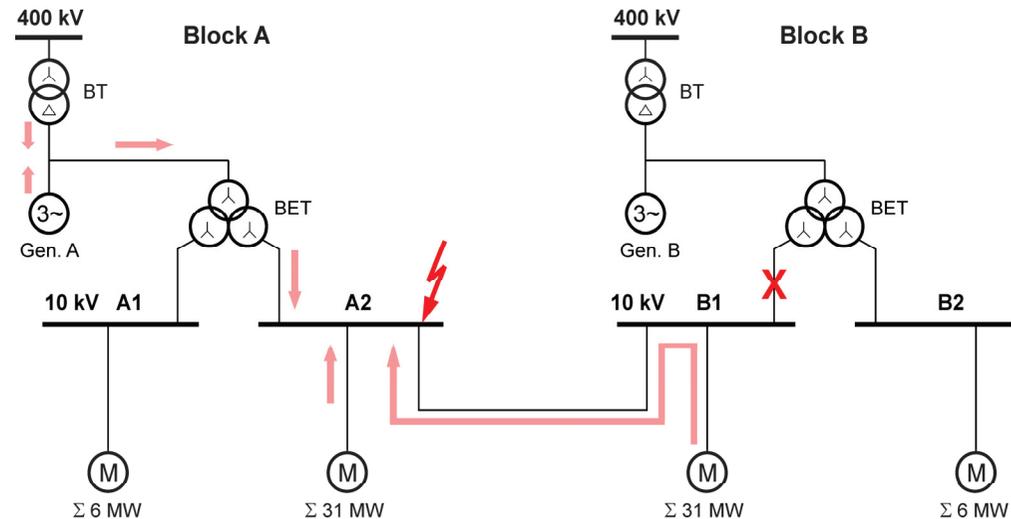
	Maximale Kurzschlussströme	Minimale Kurzschlussströme
Asynchronmotoren	ja	nein
Resistanzerhöhung durch Temperatur	nein	ja (80°C)
Spannungsfaktoren	$C_{max}$	$C_{min}$
Vorgesaltetes Netz Q	$I''_{kQmax}$ oder $S''_{kQmax}$	$I''_{kQmin}$ oder $S''_{kQmin}$
Fehlerart	dreipolig	zweipolig einpolig Lichtbogen

# Auslegungsberechnungen

- Schaltzustände im Kraftwerkseigenbedarf zur Berechnung der maximalen und minimalen Kurzschlussströme

## Maximale Kurzschlussströme

- Netzeinspeisung und
- Generatoreinspeisung und
- Motoranteile und
- Kupplung zum Nachbarblock



## Minimale Kurzschlussströme

- Netzeinspeisung ohne Generator oder
  - Generatoreinspeisung ohne Netz (Inselbetrieb) oder
  - Fremdnetzeinspeisung
- (jeweils ohne Kupplung zum Nachbarblock und ohne Motoranteile)

# Auslegungsberechnungen

## ▪ Kurzschlussstromgrößen (1)

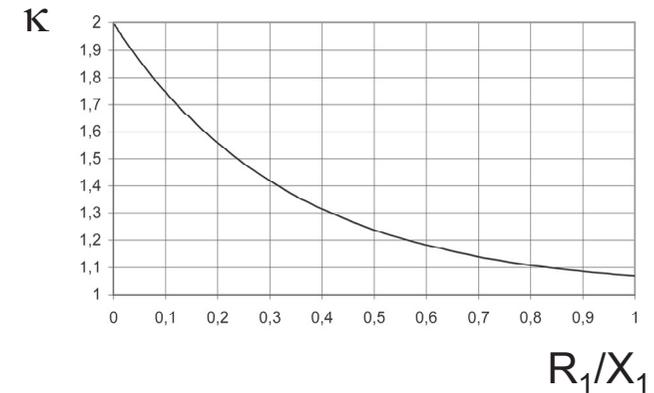
Aus dem dreipoligen Anfangskurzschlusswechselstrom  $I''_k$  werden die weiteren Kurzschlussstromgrößen ermittelt.

- Stoßkurzschlussstrom

$$i_p = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I''_k$$

Stoßfaktor

$$\kappa = f(R_1/X_1)$$



- Ausschaltwechselstrom

$$I_b = \mu \cdot I''_k$$

Abklingfaktor

$$\mu = f(I''_{kG}/I_{rG}; t_{min})$$

$t_{min}$ : Mindestschaltverzögerung

# Auslegungsberechnungen

## ▪ Kurzschlussstromgrößen (2)

- Dauerkurzschlussstrom

$$I_k = \lambda \cdot I''_{rG}$$

$$\lambda = f(I''_{kG}/I_{rG}; \text{Erregung})$$

In Mittel- und Niederspannungsnetzen gilt:  $I''_k = I_b = I_k$

Dauerkurzschlussstrom von Notstromgeneratoren:

Forderung  $I_{kG} \geq 3 \cdot I_{rG}$  für 3 s

- Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom (bezogen auf 1 s)

$$I_{th(1s)} = I''_k \cdot \sqrt{m+n} \cdot \sqrt{t_{ag}}$$

$$m = f(R_1/X_1; t_{ag})$$

$$n = f(I''_k/I_k; t_{ag})$$

$t_{ag}$  Gesamtausschaltzeit (=  $t_k$  Kurzschlussdauer)

# Auslegungsberechnungen

- Kurzschlussstromgrößen (3)

- Lichtbogenkurzschlussstrom

$$I_{kLB} = k_B \cdot I''_{k 3 min}$$

$$k_B = f(U_n; \text{Leiterabstand})$$

Richtwerte für Strombegrenzungsfaktoren  $k_B$  in Schaltanlagen

$U_n$ [kV]	$k_B$	
	Bereich	Empfohlener Wert
>1	0,97 ... 0,98	1
0,69	0,60 ... 0,75	0,65
0,40	0,40 ... 0,55	0,50

# Auslegungsberechnungen

- Impedanzen von Transformatoren und Generatoren
- Impedanzkorrekturfaktoren nach VDE 0102:2002-07 für maximale und minimale Kurzschlussströme

$$Z_{TK} = k_T \cdot Z_T$$

$$Z_{GK} = k_G \cdot Z_G$$

**Praktische Auswirkungen:**  
Berechnete minimale Kurzschlussströme werden größer als in Wirklichkeit

- Empfehlung: Beibehaltung der üblichen Praxis

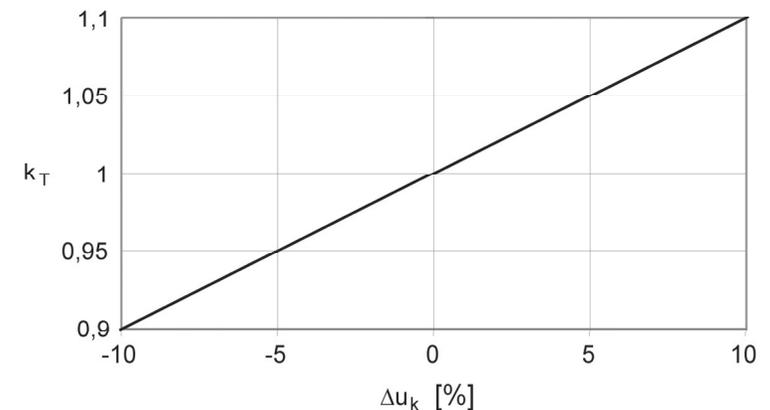
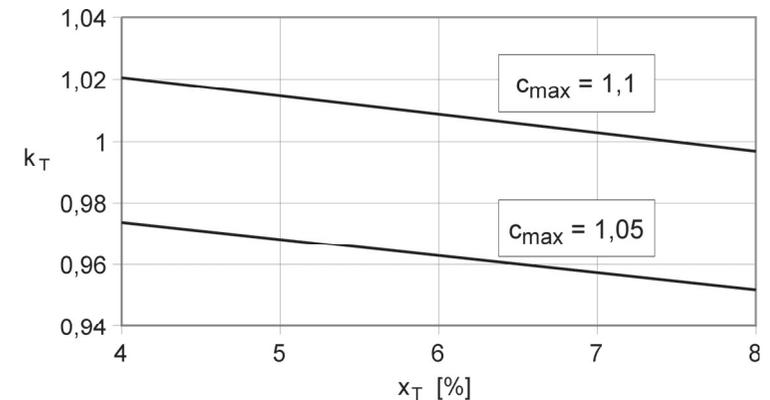
$$u_k = u_{kr} \pm \Delta u_k$$

nach VDE 0532:

$$\Delta u_k = \pm 10\%$$

Empfohlener Wert:

$$\Delta u_k = \pm 5\%$$



# Auslegungsberechnungen

## ▪ Impedanzen von Asynchronmotoren

$$Z_M = \frac{1}{a} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}$$

a: quasistationärer Anlaufstromfaktor

Bei Bildung von Ersatzmotoren: a = 5

Vernachlässigung der Motorkurzschlussströme:

$$I''_{kM} \leq 0,05 \cdot I''_k$$

Richtwerte für R/X-Verhältnis:

Motore für  $U_n > 1$  kV und  $P_{rM} < 1$  MW

$$R_M/X_M = 0,15$$

Ersatzmotore für  $U_n < 1$  kV  
einschließlich Anschlusskabel

$$R_M/X_M = 0,42$$

# Auslegungsberechnungen

## ▪ Kurzschlussstromberechnung

### ▪ Dreipolige Kurzschlussströme

Mitsystem

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_1|}$$

### ▪ Zweipolige Kurzschlussströme

Reihenschaltung von Mitsystem  
und Gegensystem

für  $Z_1 = Z_2$

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot (|Z_1 + Z_2|)}$$

$$I_{k2}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_k''$$

### ▪ Einpolige Kurzschlussströme (Erdkurzschlussströme)

Reihenschaltung von Mitsystem,  
Gegensystem und Nullsystem

$$I_{k1}'' = \frac{3 \cdot c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot (|2 \cdot Z_1 + Z_0|)}$$

Vernachlässigung der Resistenzen für

$$\frac{R}{X} \leq 0,3$$

# Auslegungsberechnungen

- Fehlerarten, die zu minimalen oder maximalen Kurzschlussströmen führen

	Maximale Kurzschlussströme	Minimale Kurzschlussströme
$U_n > 1 \text{ kV}$	$I''_{kmax} = I''_{kNmax} + I''_{kM}$ $i_{pmax} = i_{pNmax} + i_{pM}$	$I''_{k2min}$
$U_n < 1 \text{ kV}$	$I''_{kmax} = I''_{kNmax} + I''_{kM}$ $i_{pmax} = i_{pNmax} + i_{pM}$ $I_{th(1s)max} = I_{thN(1s)max} + I_{thM(1s)}$	$I''_{kmin} = \in \{I_{k1min}; I_{kLB}\}$

# Auslegungsberechnungen

- Berücksichtigung von Störlichtbögen und Sammelschienenimpedanzen

$U_n$ [kV]	Störlichtbögen		Sammelschienenimpedanzen	
	VDE 0102	technisches Erfordernis	VDE 0102	technisches Erfordernis
> 1	----	nein	----	nein
0,69	----	ja	----	ja l > 5 m
0,40	----	ja	----	ja l > 5 m

- Vorstellung Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik
- Auslegungsberechnungen
- **Beanspruchungen**
- Grundlegende Zusammenhänge bei der Planung

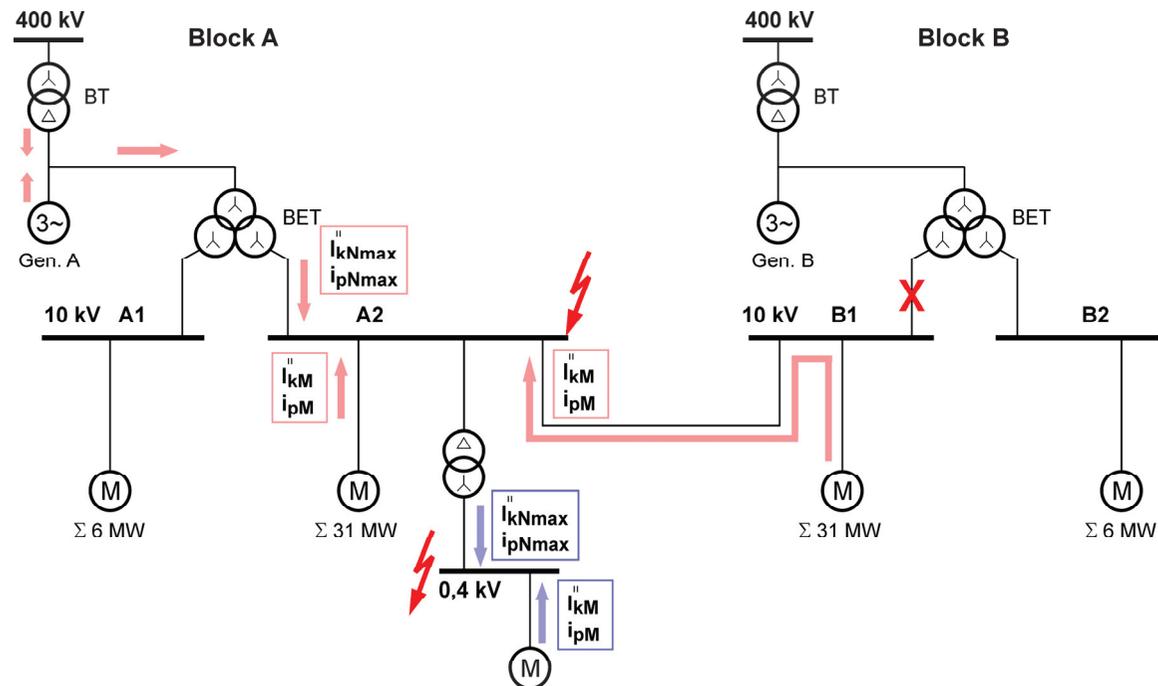
# Beanspruchungen

- **Dynamische Beanspruchungen**  $i_{pmax}$
- **Thermische Beanspruchungen**  $I_{th(1s)max}$
- **Störlichtbogenbeanspruchung**  $W_{LBmax}$

# Beanspruchungen

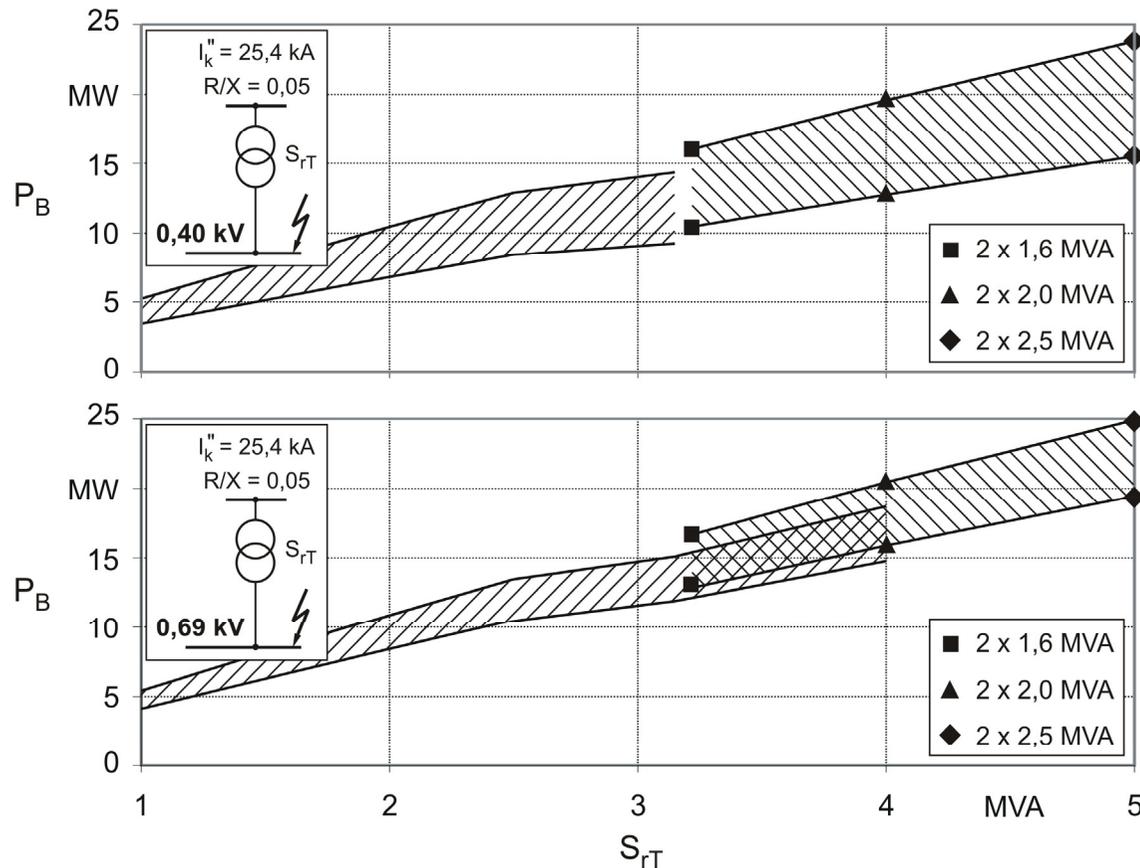
## Maximale Kurzschlussströme im Kraftwerkseigenbedarf (Beispiele)

$U_n$ [kV]	$I''_{kNmax}$ [kA]	$I''_{kM}$ [kA]	$i_{pNmax}$ [kA]	$i_{pM}$ [kA]	$I''_{kmax}$ [kA]	$i_{pmax}$ [kA]
10	22	23	60	57	45	117
0,40	44	8	103	14	52	117



# Beanspruchungen

## ■ Störlichtbogenbeanspruchungen (Beispiele)



### Lichtbogenenergie

$$W_{LB} = P_{LB} \cdot t_{ag}$$

zulässige

### Lichtbogenenergien:

- Personenschutz

$$W_{LB} \leq 250 \text{ kWs}$$

- Anlagenschutz

$$W_{LB} \leq 100 \text{ kWs}$$

# Beanspruchungen

- Erforderliche Schaltanlagenparameter

			MS-Ebene 10 kV	NS-Ebene 0,4 kV 0,69 kV
Bemessungsstoßstromfestigkeit	$I_{pk}$	[kA]	125	150
Bemessungskurzzeitstromfestigkeit	$I_{cw(1s)}$	[kA]	50	65
Bemessungsausschaltwechselstrom	$I_{ar}$	[kA]	50	
Bemessungskurzschlussausschaltstrom	$I_{cs}$	[kA]		65
<b>Störlichtbogenprüfung</b>				
Prüfstrom	$I''_k$	[kA]	50	65
Prüfdauer	$t_p$	[s]	1	0,3
Störlichtbogenleistung	$P_B$	[MW]	(50 ... 60)	(7 ... 17)

- 
- Vorstellung Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik
  - Auslegungsberechnungen
  - Beanspruchungen
  - **Grundlegende Zusammenhänge bei der Planung**

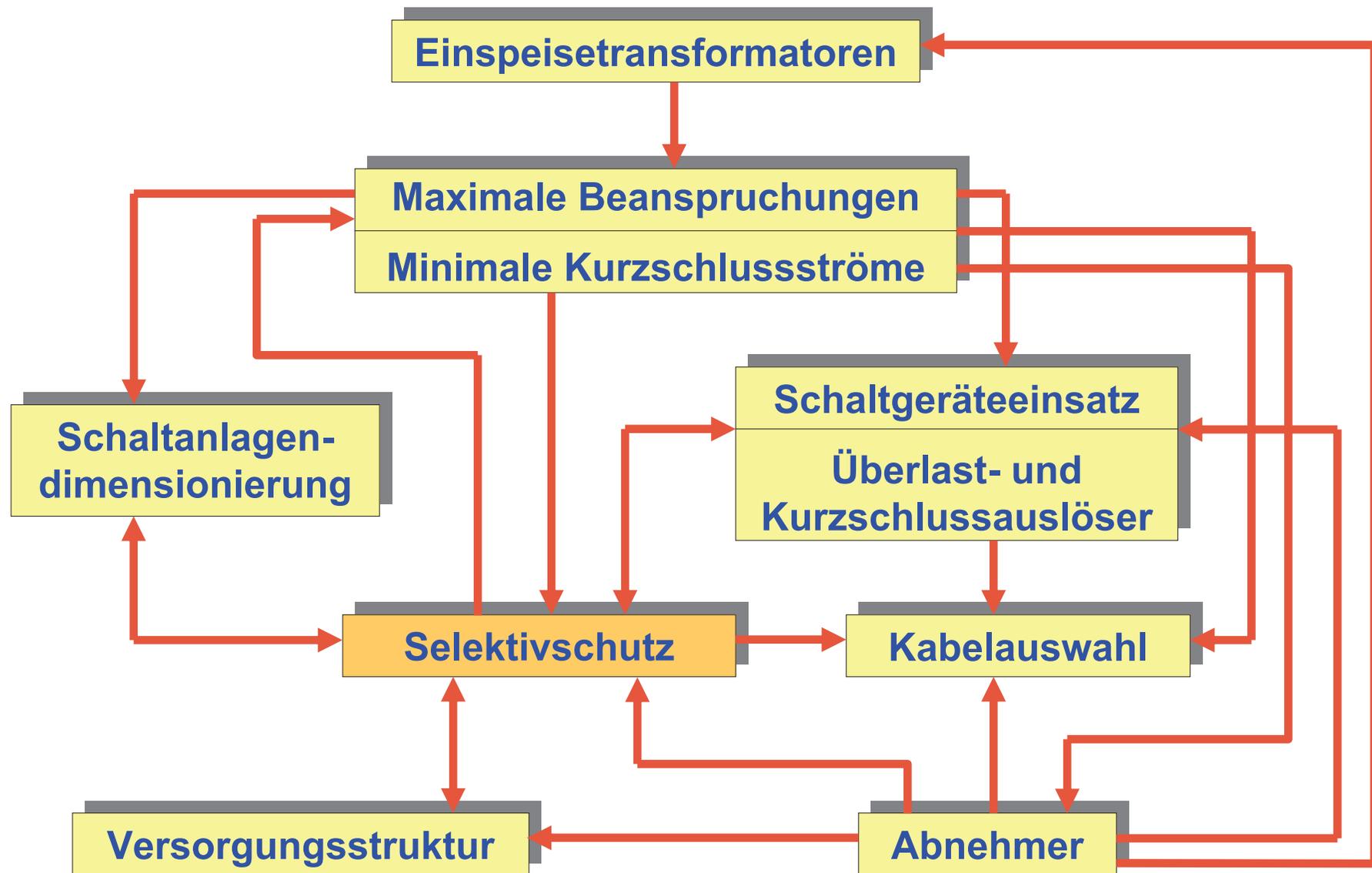
# Aufgabenkomplexe bei der Planung von Niederspannungsversorgungen

- **Festlegung der Einspeisetransformatoren**
- **Ermittlung der maximalen Kurzschlussbeanspruchungsparameter**
  - maximale Kurzschlussströme
  - thermisch gleichwertige Kurzschlussströme
  - Störlichtbogenbeanspruchung
- **Schaltanlagendimensionierung**  
bezüglich
  - thermischer und dynamischer Festigkeit
  - Störlichtbogenfestigkeit

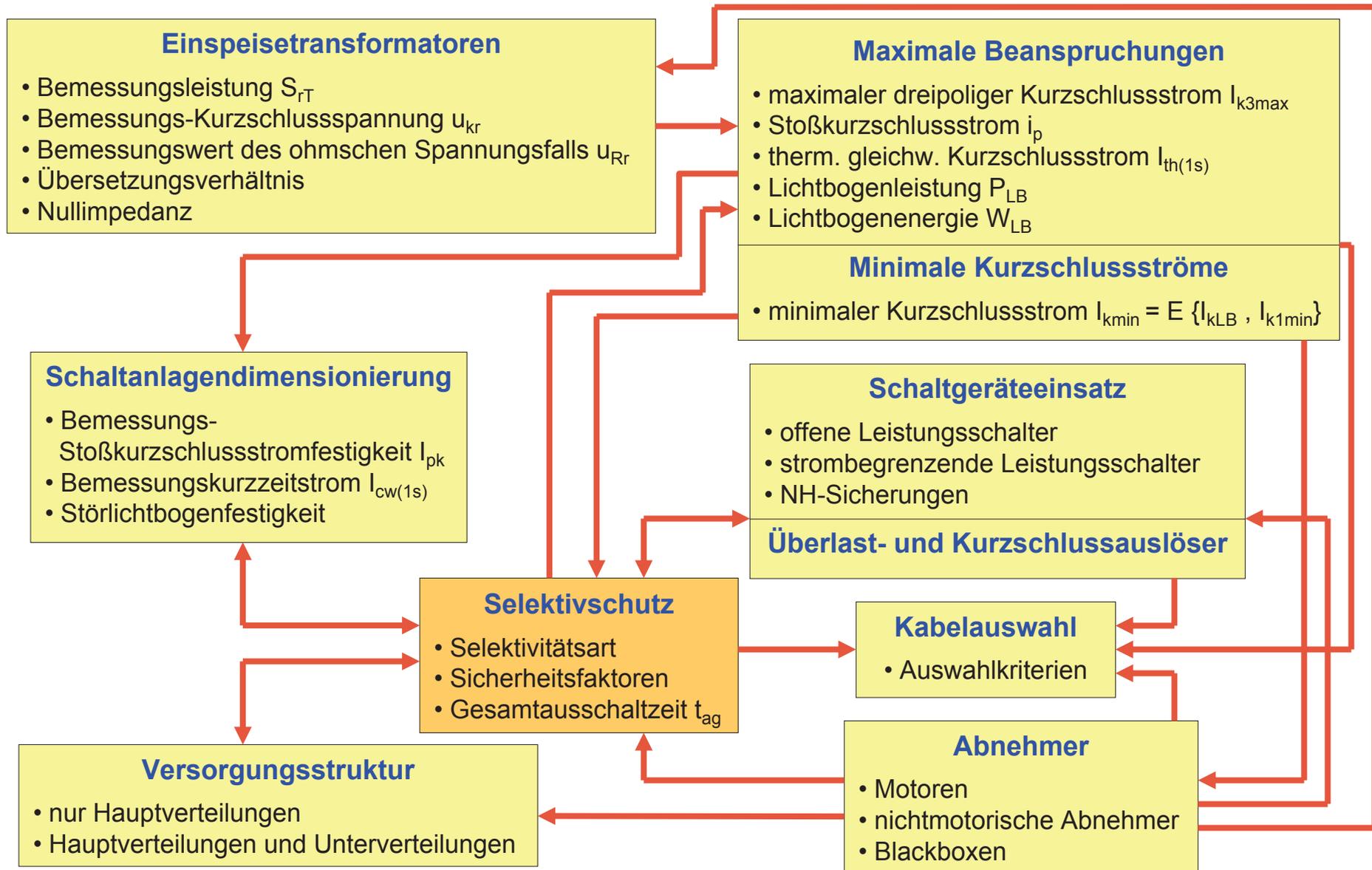
# Aufgabenkomplexe bei der Planung von Niederspannungsversorgungen

- **Festlegung einer zweckmäßigen Versorgungsstruktur und Zuordnung der Abnehmer auf die Verteilungen**
  - nur Hauptverteilungen
  - Haupt- und Unterverteilungen
- **Berechnung der minimalen Kurzschlussströme**
- **Erarbeitung eines Schutzkonzeptes und Auswahl geeigneter Schutztechnik**
  - Festlegung der Selektivitätsart
  - Festlegung der Gesamtausschaltzeit
- **Schaltgeräteauswahl unter Berücksichtigung der Vorgaben aus dem Schutzkonzept**
- **Kabelauswahl**

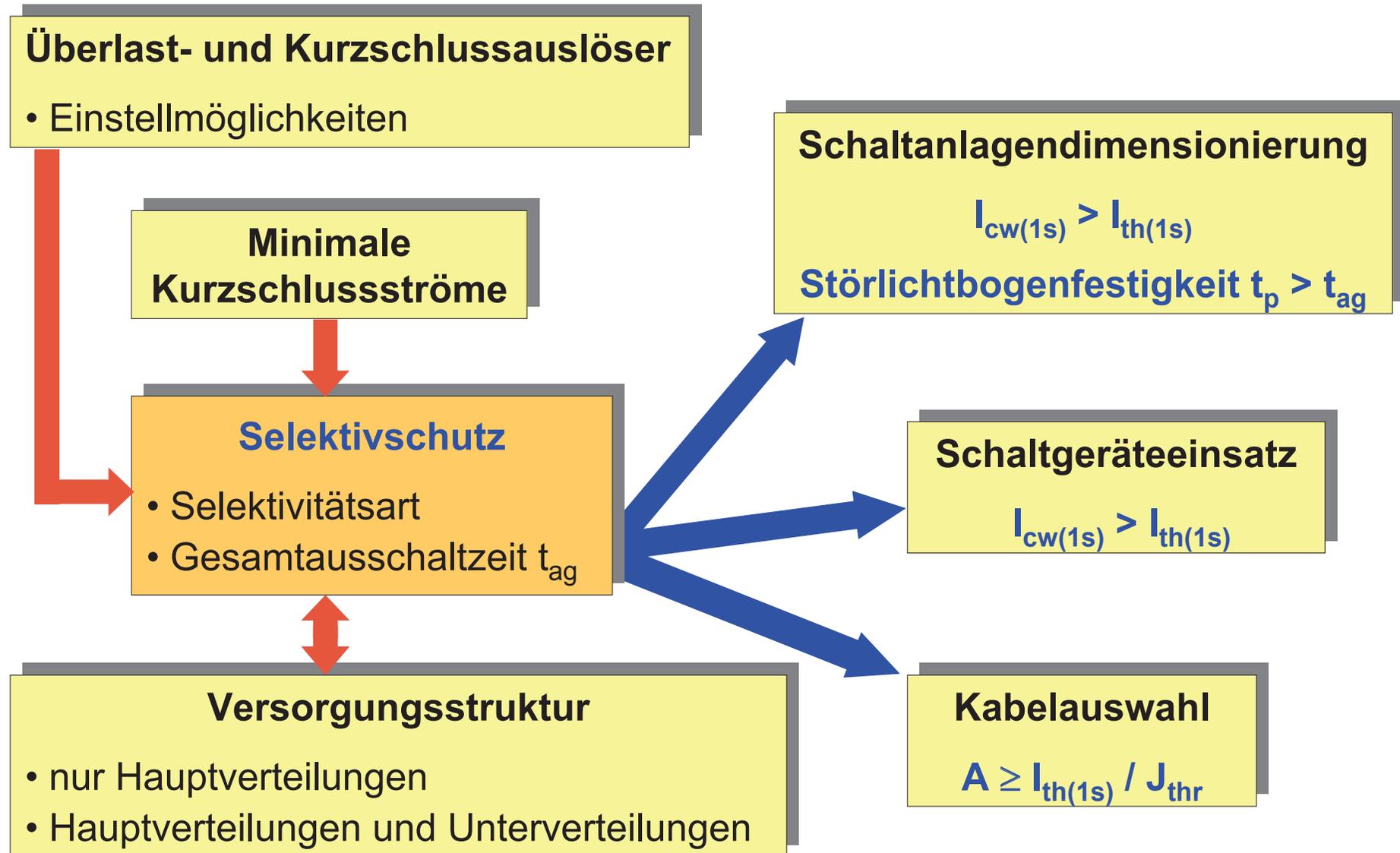
# Grundlegende Zusammenhänge bei der Planung



# Grundlegende Zusammenhänge bei der Planung



# Selektivschutz



# Selektivschutz in Niederspannungsschaltanlagen

Gesamtausschaltzeit = Verzögerungszeit + Schalterausschaltzeit

$$t_{ag} = t_v + t_{SA}$$

## Grundsatz 1

- Hauptschutz aller Leistungsschalter

$$t_{ag} \leq 100 \text{ ms}$$

## Grundsatz 2

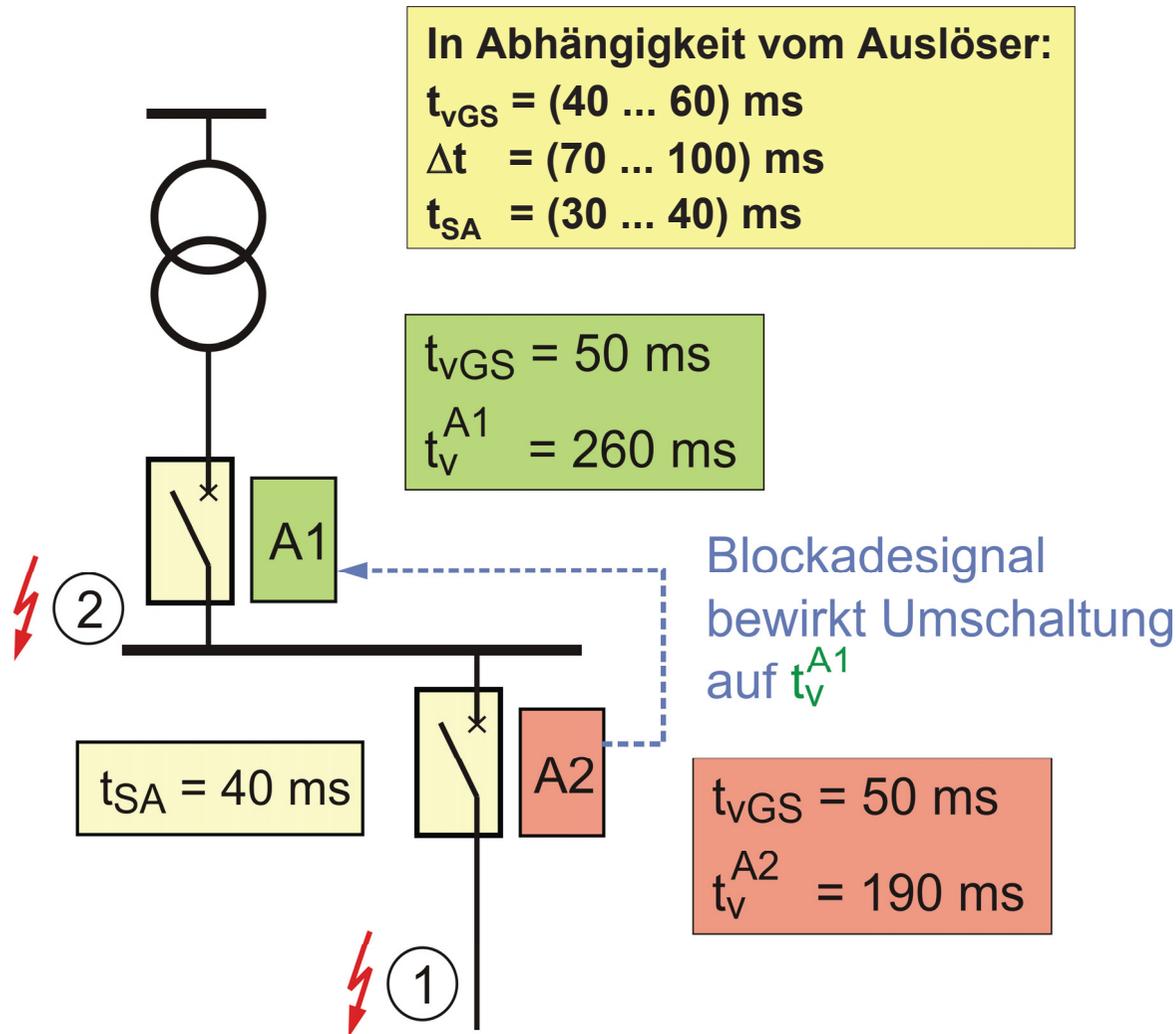
- Personenschutz auch dann, wenn Schutz- oder Schaltertechnik versagt
- Reserveschutz der Einspeiseleistungsschalter

$$t_{ag} < t_p$$

$t_p$  Prüfdauer bei Störlichtbogenprüfungen

# Selektivschutz in Niederspannungsschaltanlagen

## Gesteuerte Selektivität



## Hauptschutz

für Fehlerorte ① und ②

$$t_{vGS} = 50 \text{ ms}$$

$$t_{SA} = 40 \text{ ms}$$

$$t_{ag} = 90 \text{ ms}$$

## Reserveschutz

für Fehlerort ①

$$t_v^{A1} \geq t_{vGS} + \Delta t$$

$$\Delta t = 70 \text{ ms}$$

$$t_v^{A1} = 260 \text{ ms}$$

$$t_{ag} = 300 \text{ ms}$$

# Selektivschutz in Niederspannungsschaltanlagen

## ▪ Gesteuerte Selektivität

### Herstellerbezeichnungen

ABB

GE Power Controls (AEG)

Moeller

Siemens

Zonenselektivität (ZS)

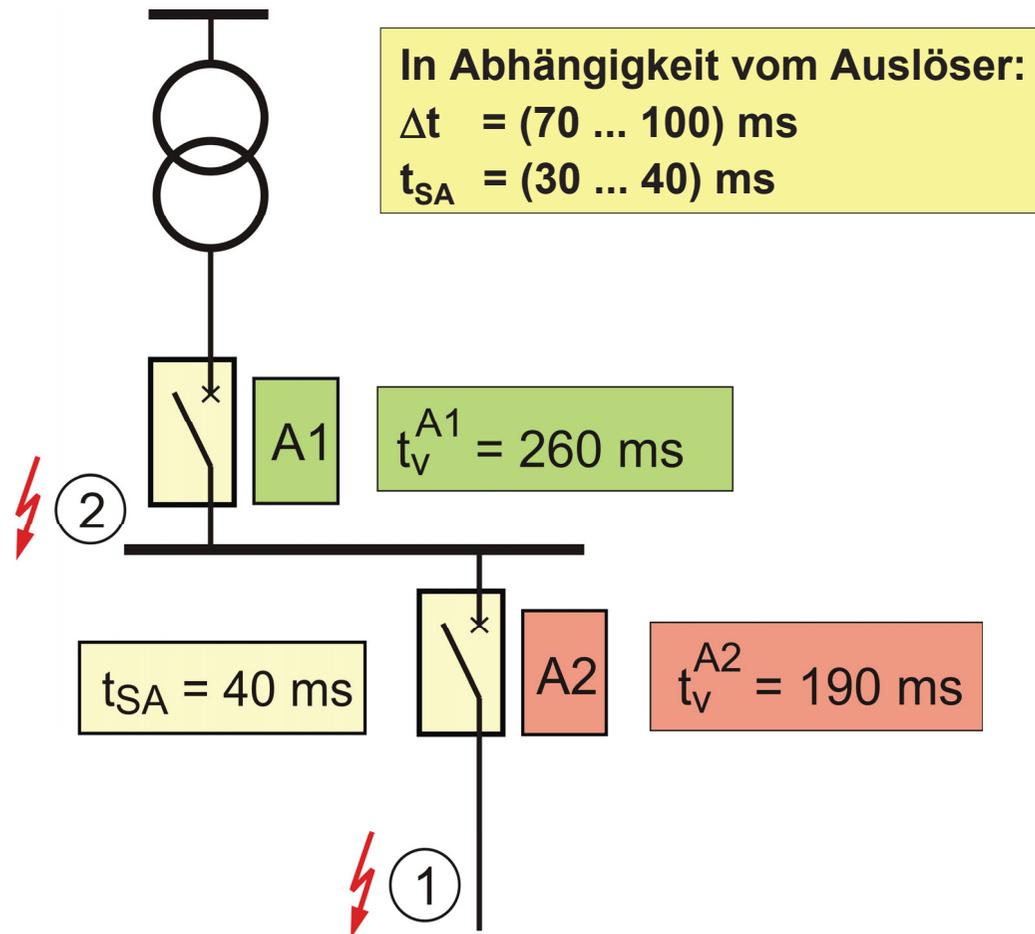
Zeitverkürzende Selektivität (ZVS)

Logische Selektivität

Zeitverkürzte Selektivitäts-Steuerung (ZSS)

# Selektivschutz in Niederspannungsschaltanlagen

## Zeitselektivität



## Hauptschutz

für Fehlerort ①

$$t_v^{A2} = 190 \text{ ms}$$

$$t_{ag} = 190 \text{ ms} + 40 \text{ ms} = 230 \text{ ms}$$

für Fehlerort ②

$$t_v^{A1} = 260 \text{ ms}$$

$$t_{ag} = 260 \text{ ms} + 40 \text{ ms} = 300 \text{ ms}$$

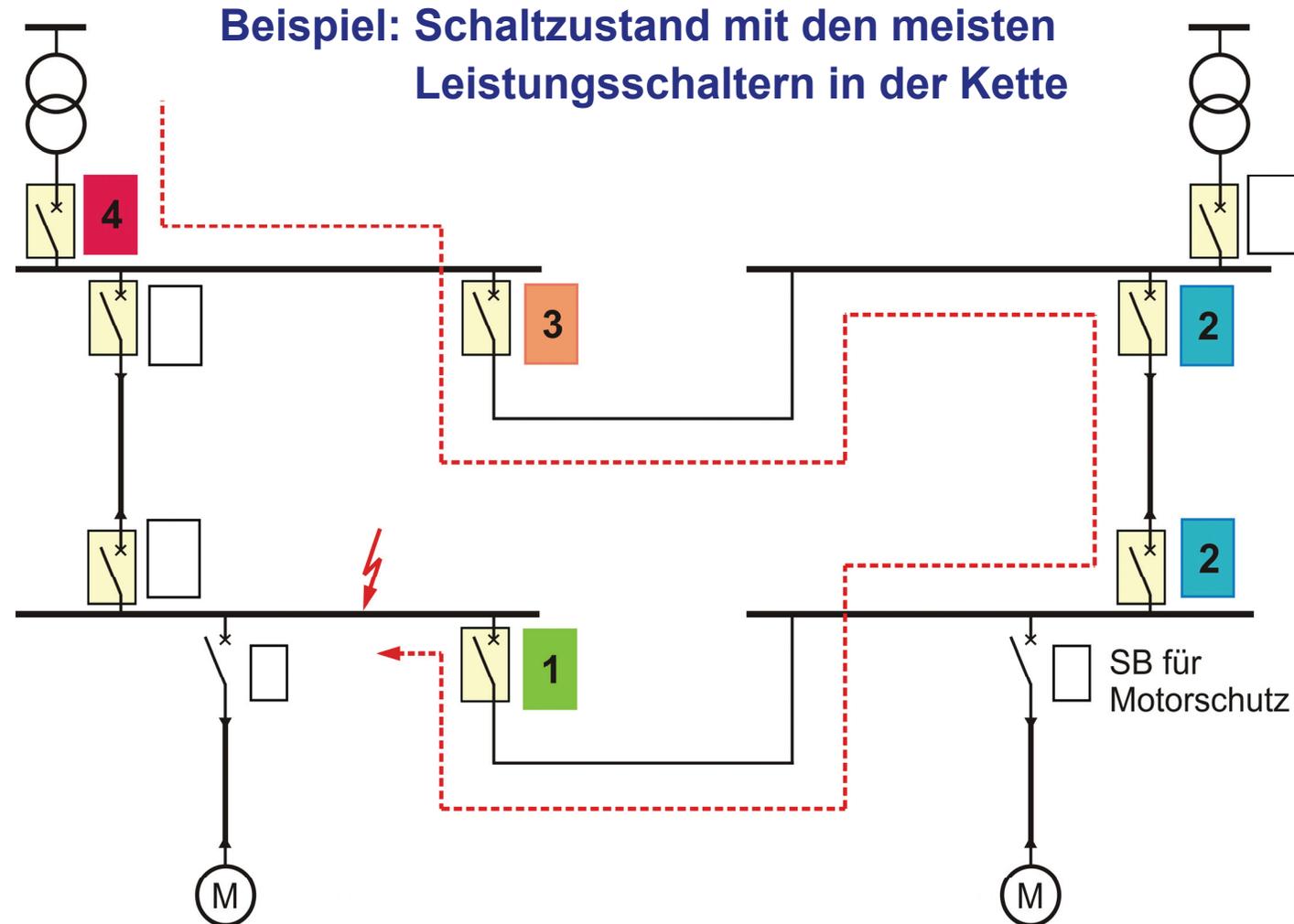
## Reserveschutz

für Fehlerort ①

$$t_{ag} = 260 \text{ ms} + 40 \text{ ms} = 300 \text{ ms}$$

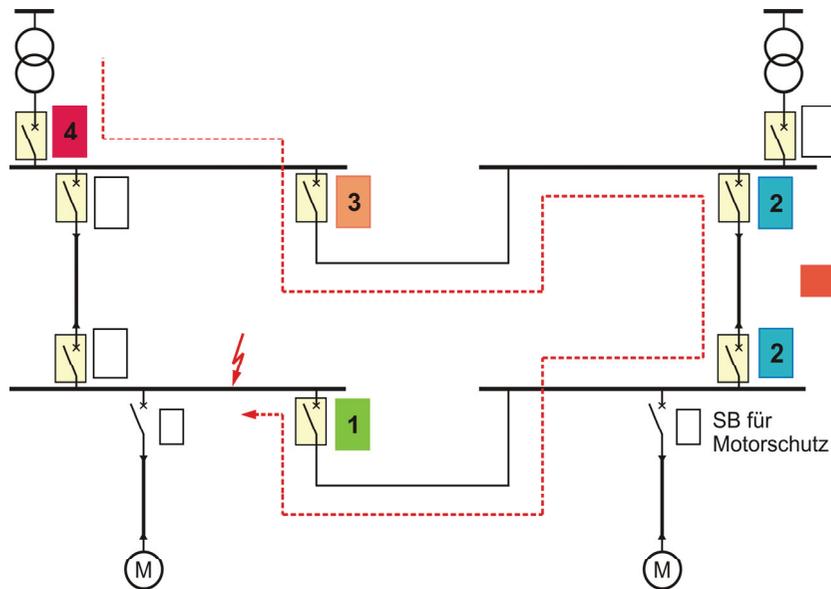
# Versorgungsstruktur in der Niederspannungsebene

- Versorgungsstruktur mit kuppelbarer Haupt- und Unterverteilung

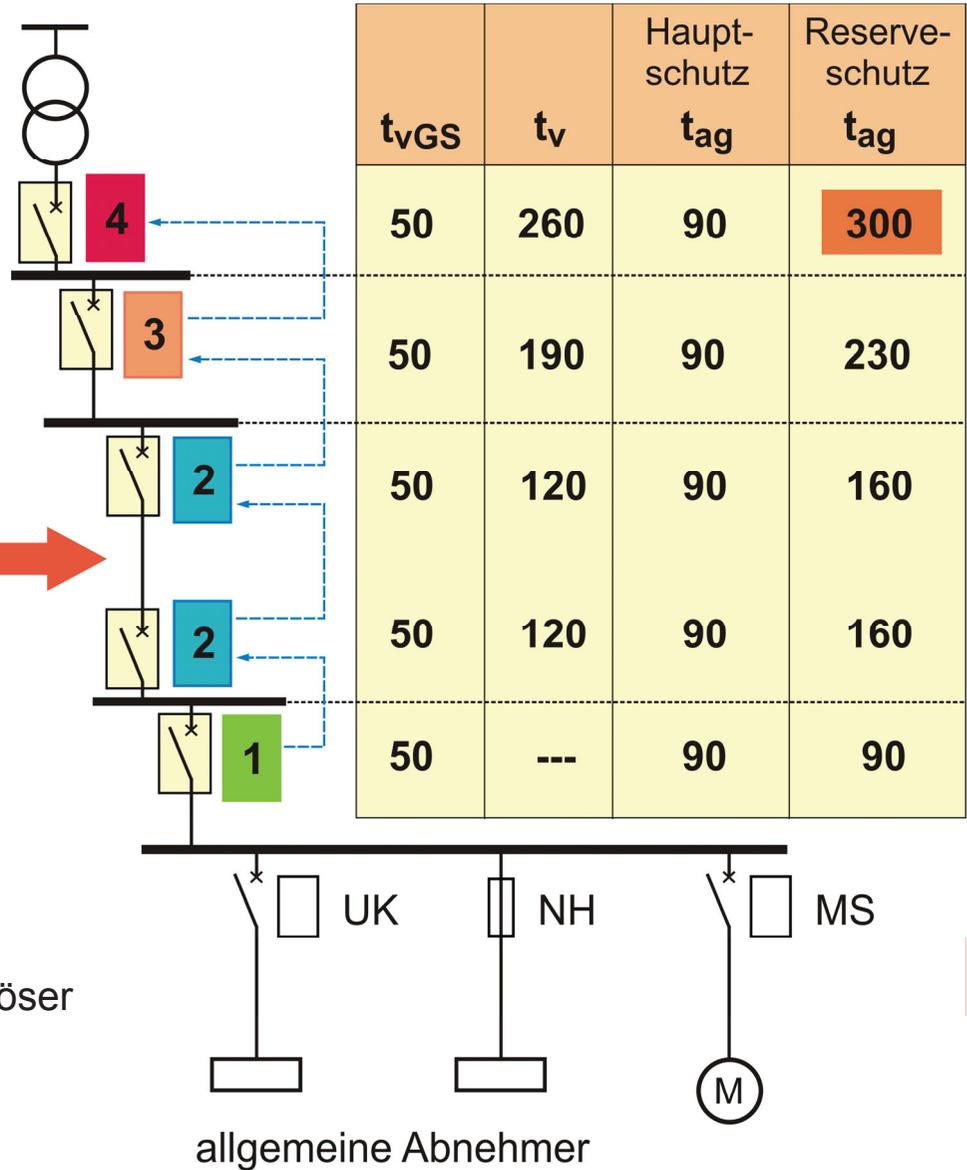


# Versorgungsstruktur in der Niederspannungsebene

## Realisierung mit Gesteuerter Selektivität

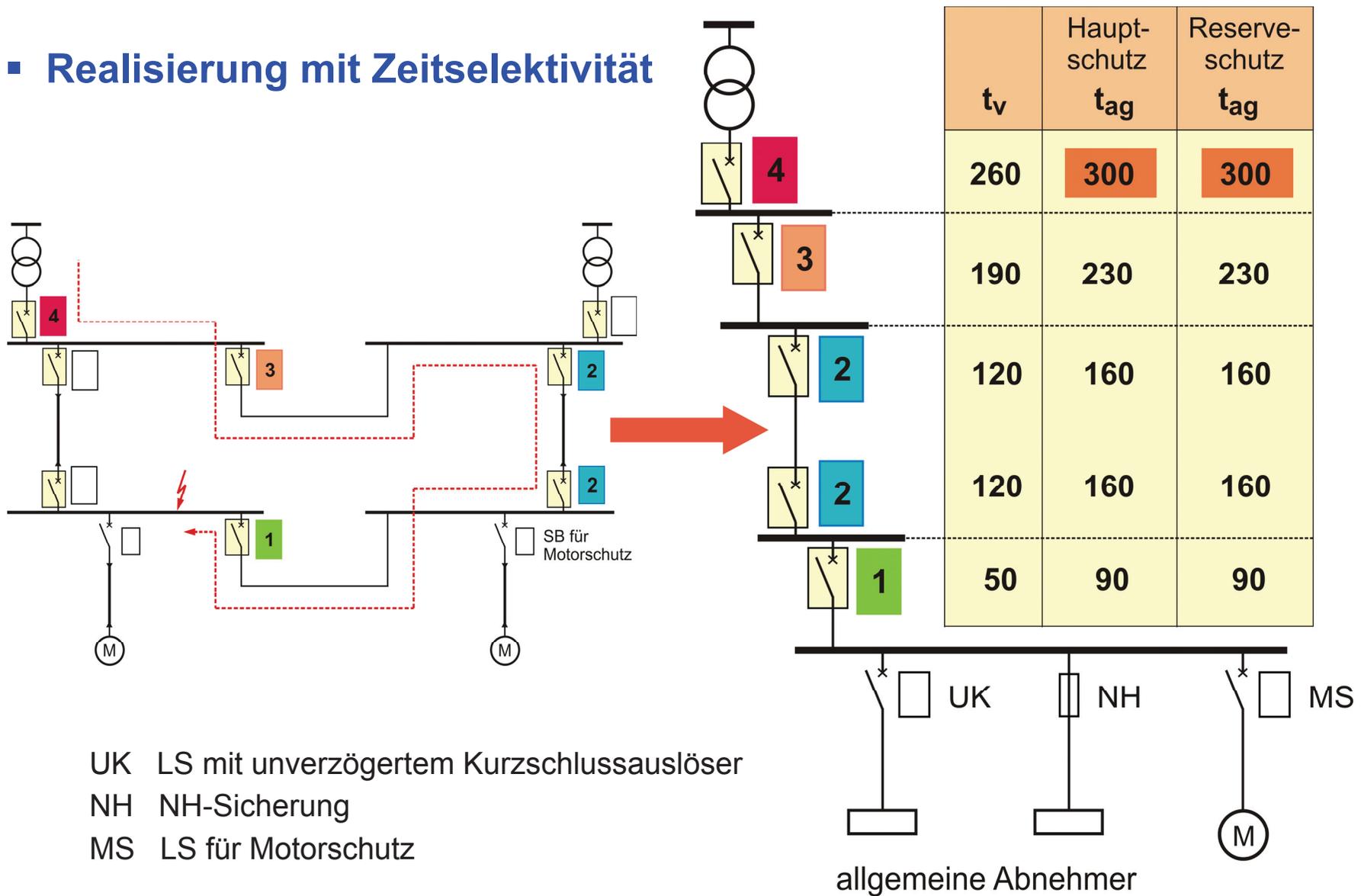


- UK LS mit unverzögertem Kurzschlussauslöser
- NH NH-Sicherung
- MS LS für Motorschutz



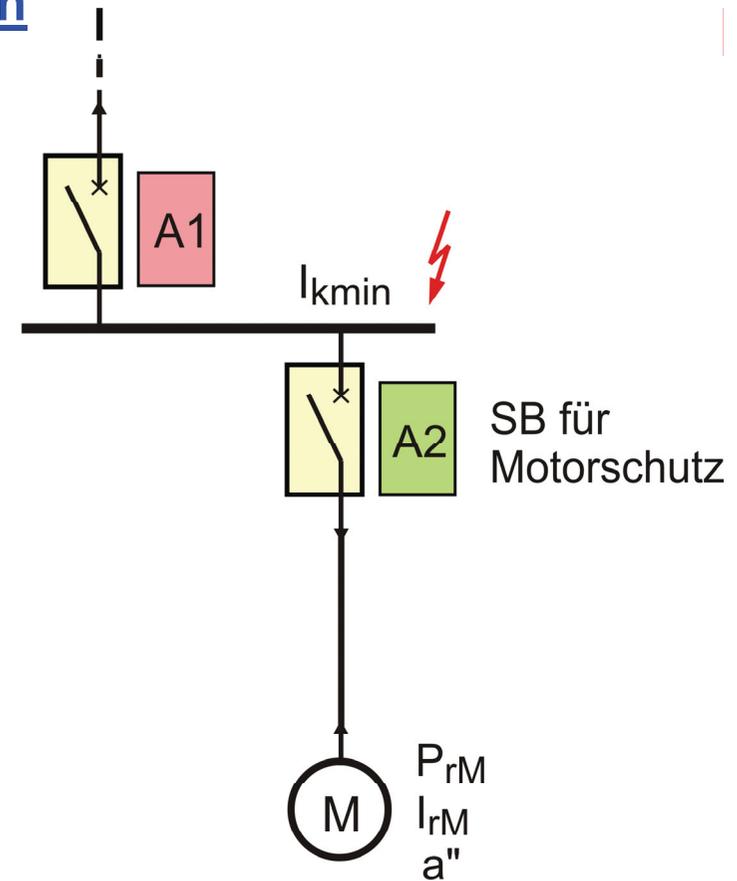
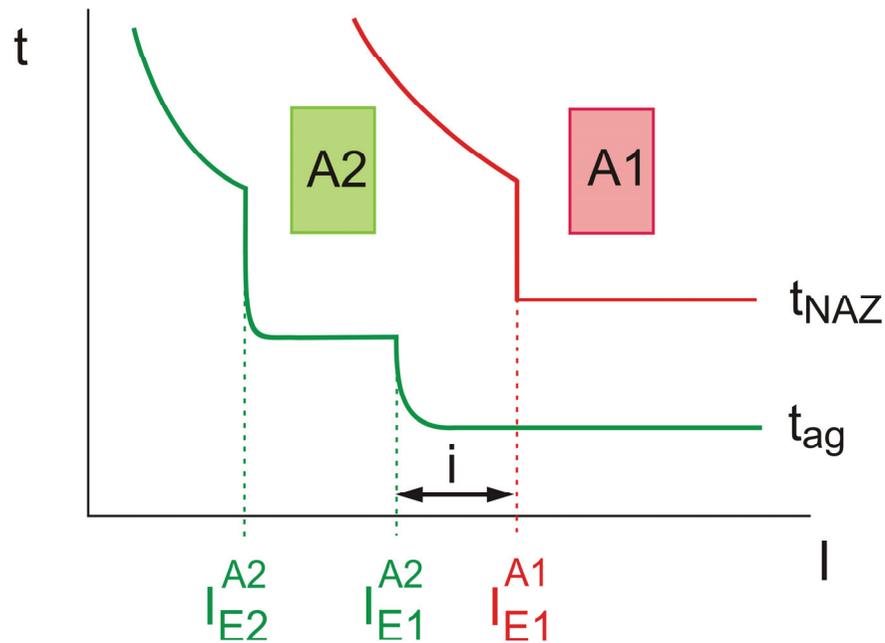
# Versorgungsstruktur in der Niederspannungsebene

## Realisierung mit Zeitselektivität



# Einfluss der Abnehmer

## Zulässige Motorbemessungsleistungen



$$I_{E1}^{A1} \leq \frac{1}{S} \cdot I_{kmin}$$

$$I_{E1}^{A2} \geq s_n \cdot a'' \cdot I_{rM}$$

$$I_{E1}^{A2} \leq \frac{1}{i} \cdot I_{E1}^{A1}$$

# Einfluss der Abnehmer

- Zulässige Motorbemessungsleistungen

$$I_{rM} \leq (s \cdot s_n \cdot i \cdot a'')^{-1} \cdot I_{kmin}$$

## Gewählte Parameter

$s = 1,3$

$i = 1,25$

$\cos \varphi \eta_M = 0,8$

$s_n = 1,2$

$a'' = 14$

## Motorbemessungsleistungen

$U_n$ [V]	$P_{rM}$ [kW]
400	$\leq 20 I_{kmin}$
690	$\leq 35 I_{kmin}$

minimaler Kurzschlussstrom  $I_{kmin} = E \{I_{k1}, I_{kLB}\}$

# Entwicklungsschritte zum Aufbau der Gesteuerten Selektivität

- 1 **Bestimmung des längsten Weges der Selektivitätskette für die gewünschten Schaltzustände**
- 2 **Ermittlung des Abganges mit der größten Verzögerungszeit am Ende der Selektivitätskette**  
⇒ daraus wird die Anfangszeit der Zeitstaffelung  $t_{anf}$  ermittelt
- 3 **Selektivität zwischen Leistungsschaltern in der Verbindung zwischen Haupt- und Unterverteilung nicht erforderlich**
- 4 **Wenn Abschaltung des Einspeiseleistungsschalters in Reserveschutzzeit, dann keine Selektivität zum überspannungsseitigen Leistungsschalter erforderlich**  
⇒  $t_{vmax} = 260 \text{ ms}$