

SCHUTZTECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN FÜR ZUKÜNFTIGE NETZE UND MÖGLICHE LÖSUNGSPFADE

L. Fickert

E. Hufnagl

Physikalische Größen der Elektrotechnik

V

Physikalische Größen der Elektrotechnik

V, A

„Physikalische Größen“ der Elektrotechnik

V, A, s

„Physikalische Größen“ der Elektrotechnik

V, A, s, € / \$ / 元

„Physikalische Größen“ der Elektrotechnik

V, A, s, € / \$ / 元, §

„Physikalische Größen“ der Elektrotechnik

V, A, s, €/\$/元, §, Ψ

Entwicklungs- Tendenzen

Netzsystemausbau =

Neue Erzeugungsanlagen

(angebotsorientiert)

&

Netzausbau

(nachfrageorientiert, structure follows strategy)

Neue Erzeugungsanlagen

inverterbasiert (WR, DFIG)

Einspeisung

fluktuierend

kostenmäßige Restriktionen

Schutz der Neuen Erzeugungsanlagen

„Eigensicherung vor Fremdschutz“

(historisch Netzentkupplung bei $U >$, $U <$, $f >$, $f <$)

Schutz der Netze

historisch i.a. $I >$ -orientiert

NEU: ???

Quellen

Fehlerströme (Energiefluss)

Primärenergie-Quelle

→ Wechselrichter (Halbleiter)

→ Leitungszug

→ Fehlerstelle

Verluste im Halbleiter $P = U \cdot I$ $I = 100 \text{ A}$ $U = 0,6 \text{ V}$
 $P = 60 \text{ W}$ $1 \text{ kW} / \text{kg} = 1 \text{ kW} / 60 \text{ cm}^3$

Thyristor-Modul, Reihenschaltung, 116A, 1600V



$I^2t = 20.000 \text{ A}^2\text{s}$



$I^2t = 250.000 \text{ A}^2\text{s}$

Fehlerströme (Energiefluss)

Primärenergie-Quelle

→ Wechselrichter (Halbleiter)

→ Leitungszug

→ Fehlerstelle

Verluste im Halbleiter $P = U \cdot I$ $I = 100 \text{ A}$ $U = 0,6 \text{ V}$
 $P = 60 \text{ W}$ $1 \text{ kW} / \text{kg} = 1 \text{ kW} / 60 \text{ cm}^3$

Thyristor-Modul, Reihenschaltung, 1



„Eigensicherung vor Fremdschutz!“

$20.000 \text{ A}^2\text{s}$

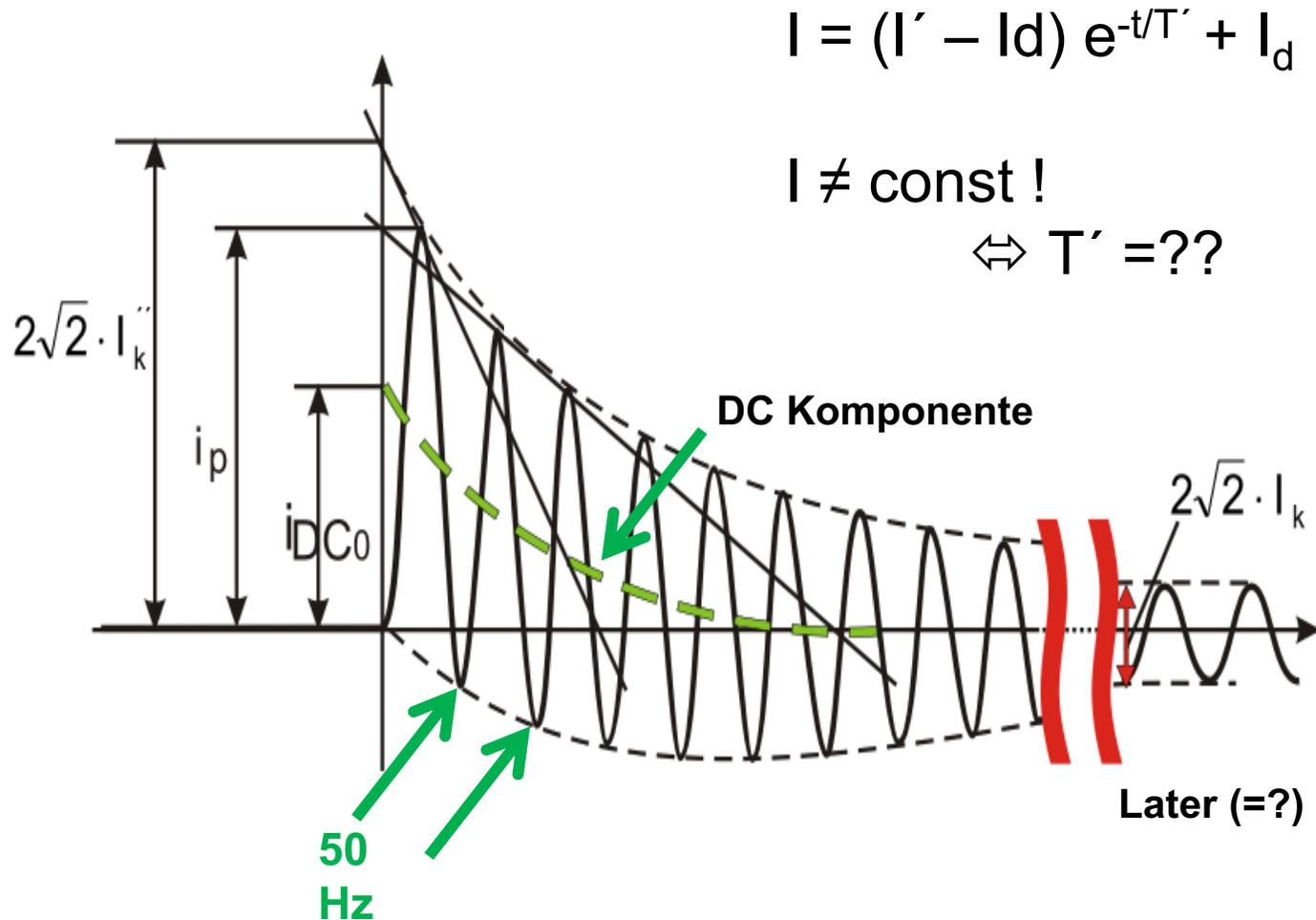
$I^2t = 250.000 \text{ A}^2\text{s}$

Bei der Konstruktionsphilosophie
„Selbstschutz vor Fremdschutz!“
gibt es

- **keine Selektivität**

bei Überstrom-Zeitstaffelschutz-Schemata
(Mittelspannungsebene, Niederspannungsebene)

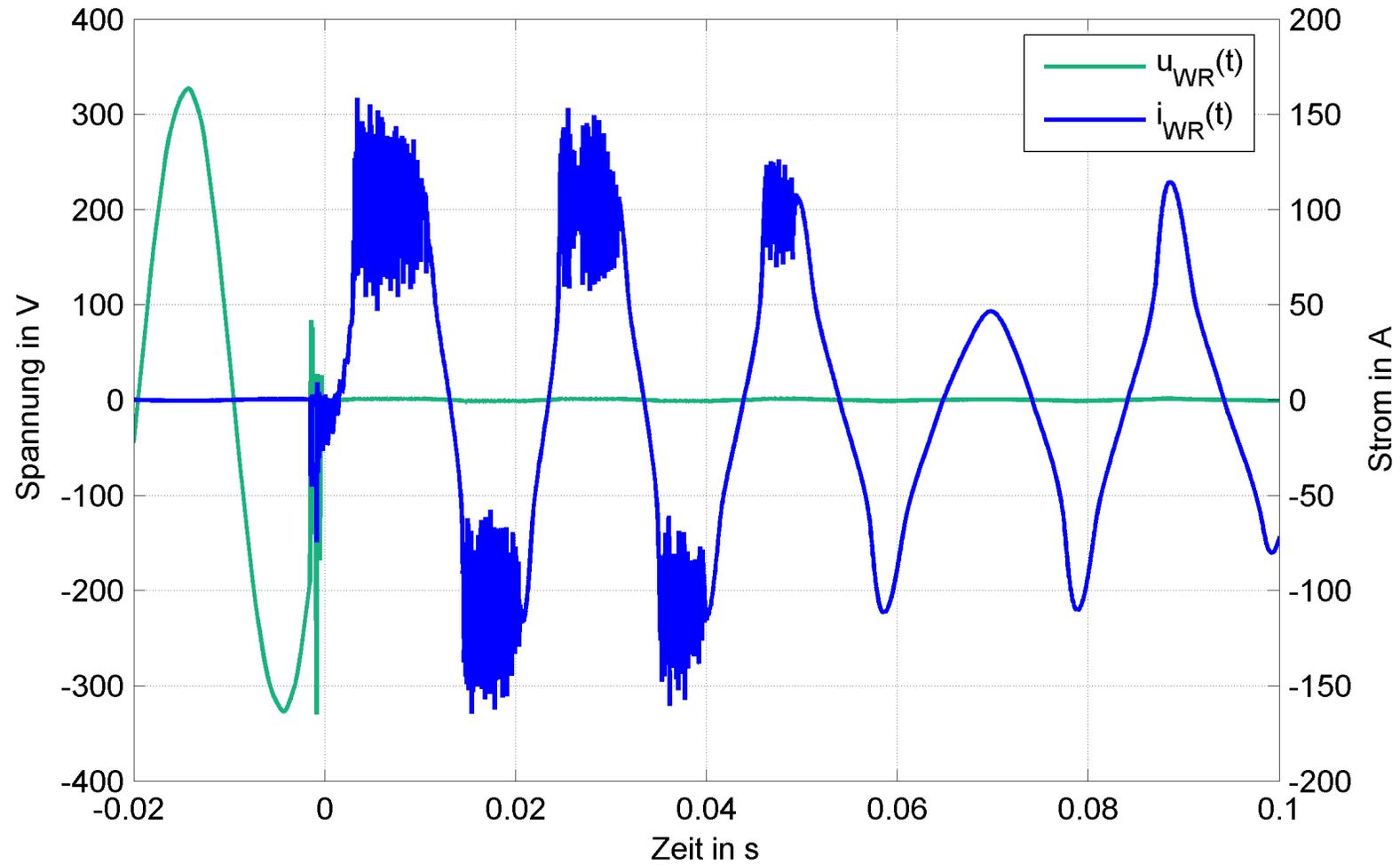
Ströme



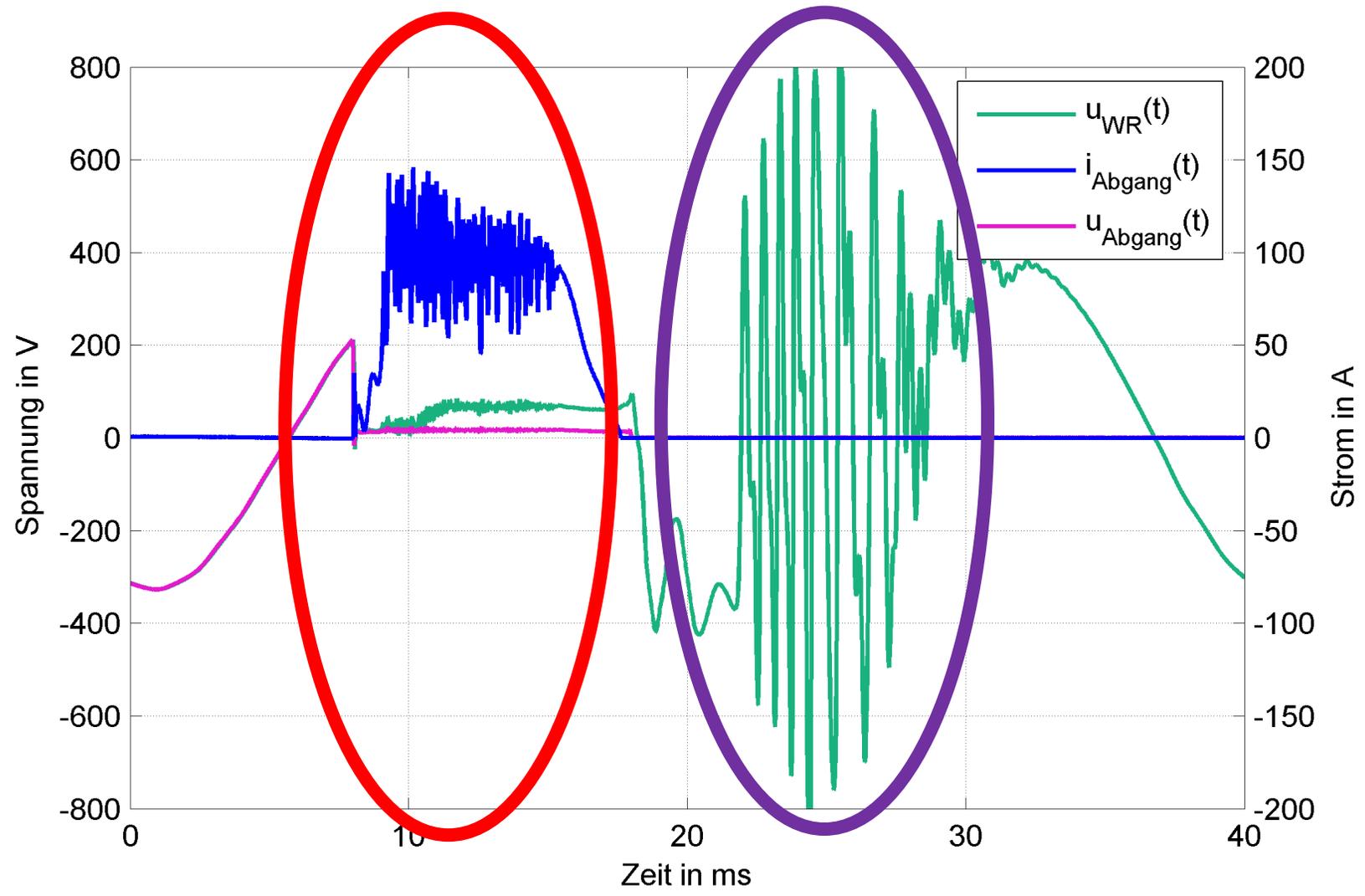
$$I = (I' - I_d) e^{-t/T'} + I_d$$

$I \neq \text{const} !$
 $\Leftrightarrow T' = ??$

$I < 0,5 I_N$
 ... Compoundierung in der Erregung



50 Hz



Bei den heutigen Konstruktionen der Regelkreise von Wechselrichtern greift die übliche Einstellung eines Kurzschlussschutzes mit

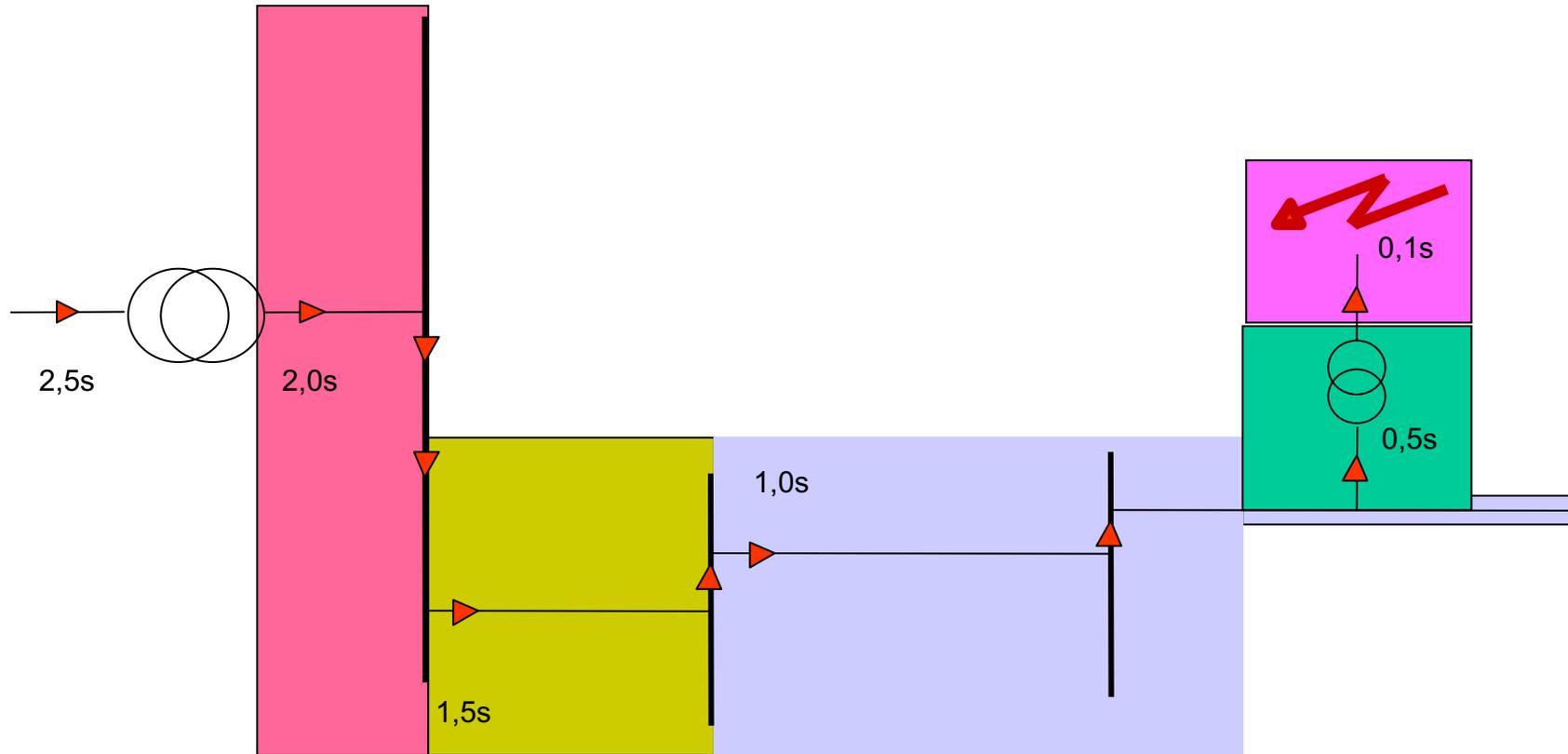
$$I_{\text{schutz,Leitung}} = 1,2 \cdot I_{\text{N,Leitung}}$$

nicht mehr zwangsläufig ein.

Nicht planbare Fehlerstrom- Richtung

Anforderungen:

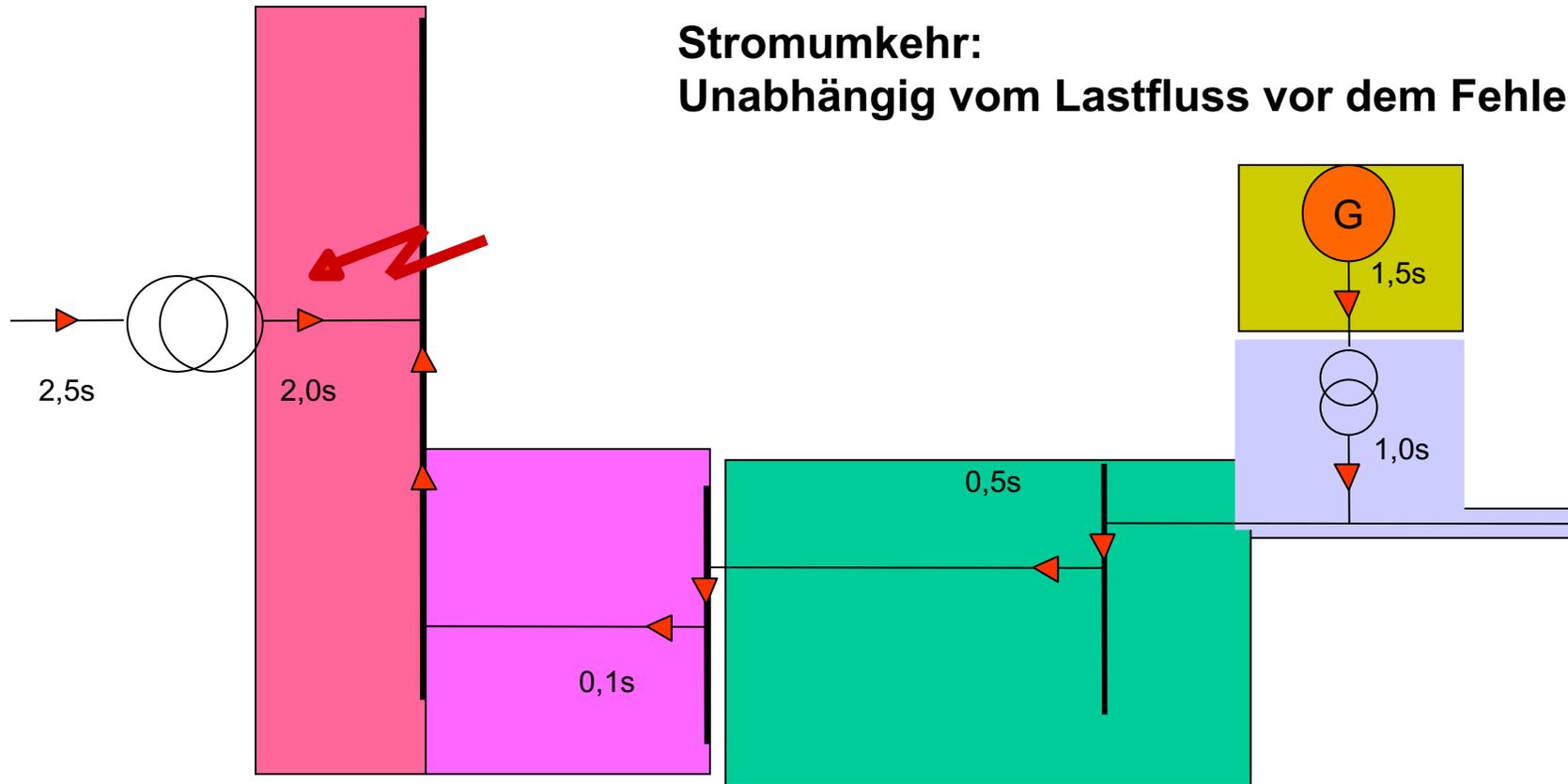
Selektive Fehlerabschaltung
Ausreichend Kurzschlussstrom



Anforderungen:

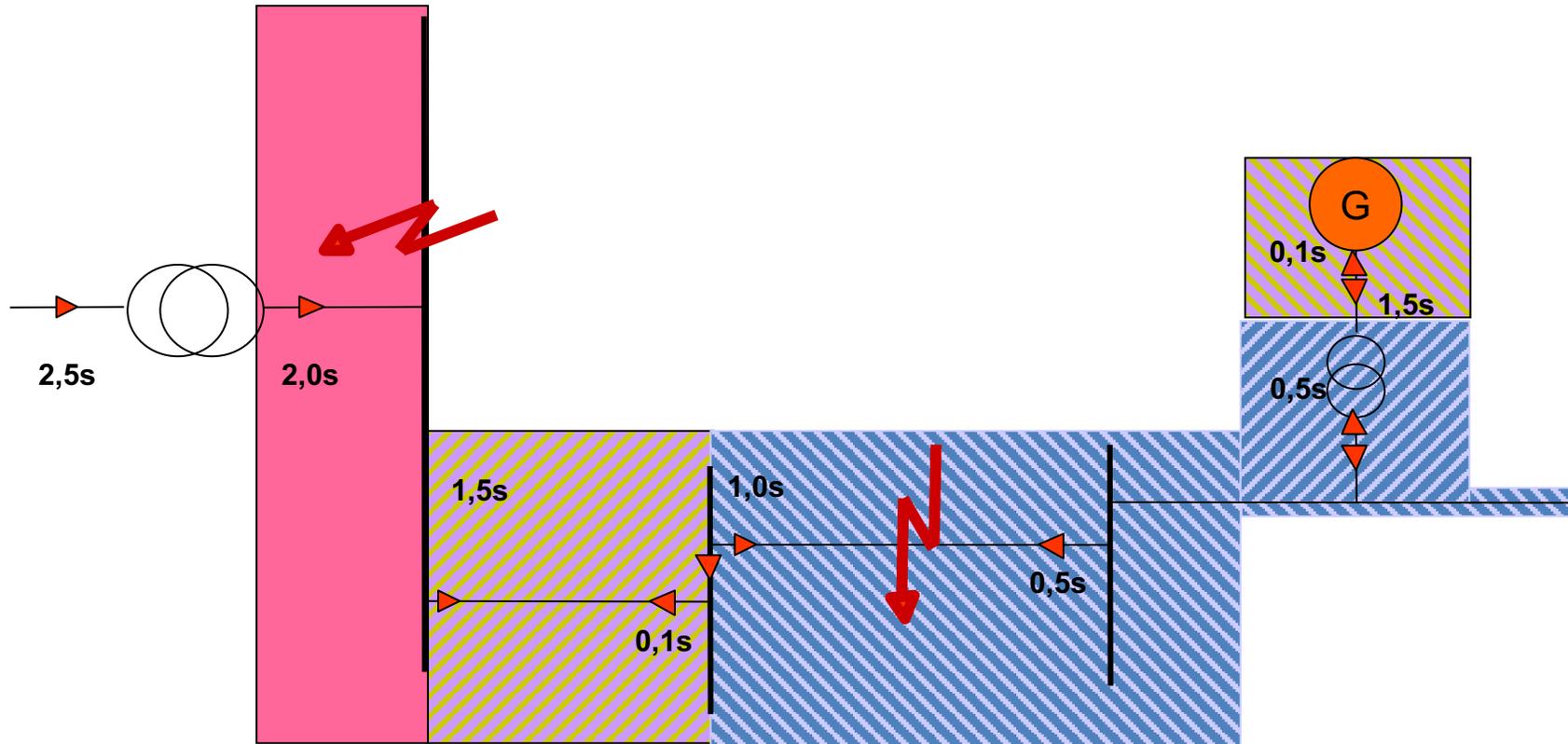
Selektive Fehlerabschaltung
Ausreichend Kurzschlussstrom

Stromumkehr:
Unabhängig vom Lastfluss vor dem Fehler



Klassische Lösung:

bi-direktionaler Überstromzeitstaffelschutz



Fehlerschleife stellt aus physikalischen Gründen eine (wirk-)verlustbehaftete Induktivität dar

→ Strom eilt der Spannung nach

→ bidirektionaler Blindleistungsfluss

Richtungsentscheid durch Auswertung der Phasenlage notwendig.

Netzsektor

Wunsch nach kleinräumig autonomen / autarken Netzregionen
bzw.
großräumigen, übergeordneten Systemschutzeinrichtungen

→ Wide-Area-Protection

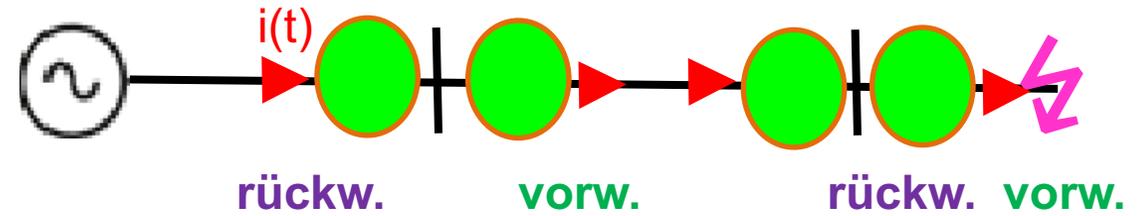
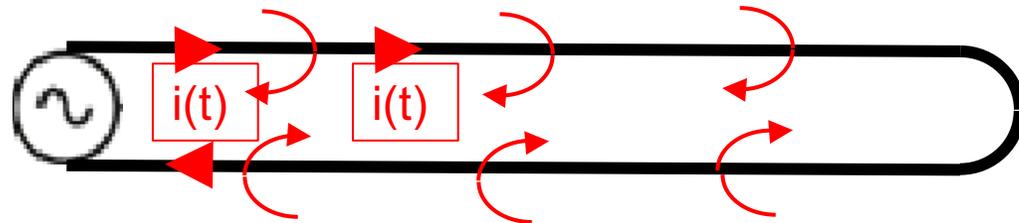
- Eingriff in die Netzregler
- Einbeziehung der Vorfehler-Lastflusssituation und der prospektiven Nachfehler- Vorfehler-Lastflusssituation

Großräumig präventives Schalten als Netzschutzkonzept

Lösungspfade für Selektivschutz

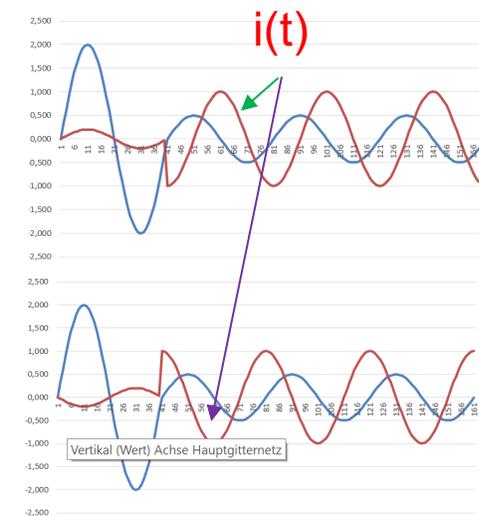
Richtungs- Bestimmung

Die Fehlerschleife



$$w(t) = \int \frac{1}{2} \cdot B(t) \cdot H(t) dV = \int \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot B^2(t) dV = \frac{L}{2} \cdot i(t)^2$$

$$p(t) = \frac{R}{2} \cdot i(t)^2$$

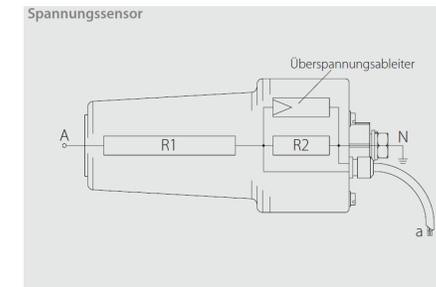
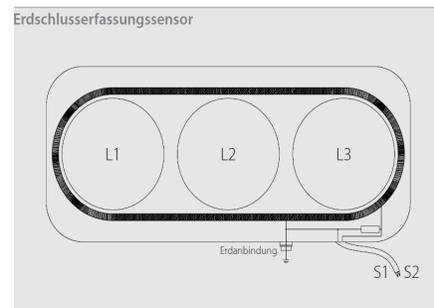
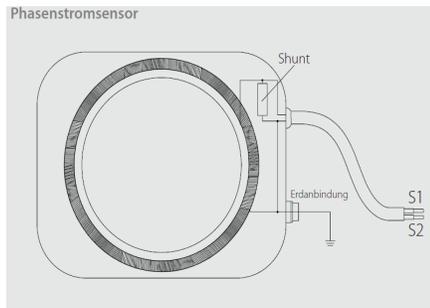


vorwärts

rückwärts

Erfassen und Auswerten der Phasenlage von Spannung und Strom

$i(t)$ nach $u(t)$ = vorwärts
 $i(t)$ vor $u(t)$ = rückwärts



Nachrüstungen (Sensoren, Auswerte-Einheiten) sind nötig.

Schneller Selektivschutz

z.B. Sechssystemiger Distanzschutz mit **Weak-Infeed**-Capability

z.B.

Freigabe-Verfahren

(PUTT, POTT, signal mirroring)

Blockade-Verfahren

(Reverse Power Blocking, RPB)

Zusätzlich bei Vermaschung: Transient Blocking (TB)

Oder

Differentialschutz

ODER

Rückwärtige Blockierung

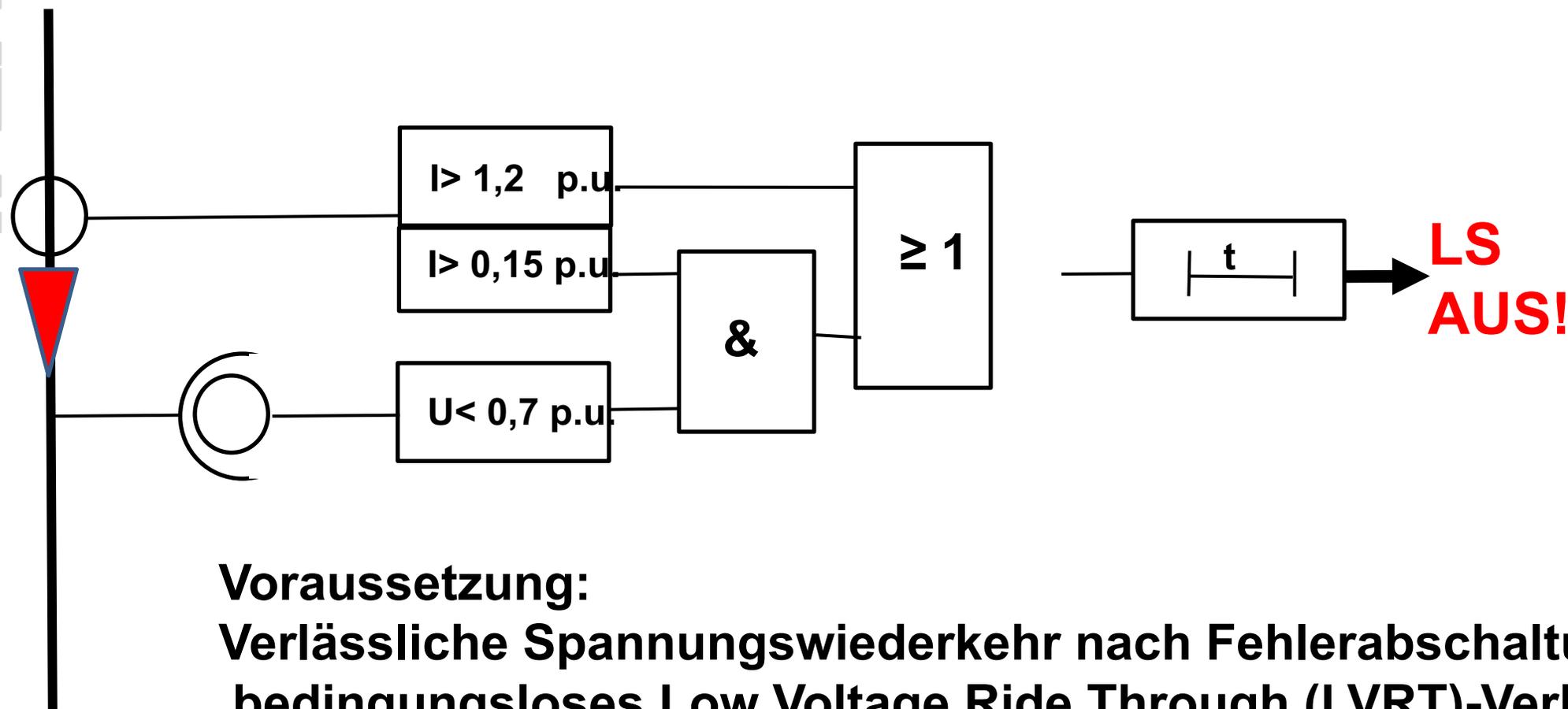
$$U >_{z.B.} 0,7 \text{ p.u.} \quad \rightarrow I_{Anreg.} = 1,2 I_N$$

$$U <_{z.B.} 0,7 \text{ p.u.} \quad \rightarrow I_{Anreg.} = 0,1 I_N$$

Nachrüstungen (Schutzrelais, Signalstecken) sind nötig.

Weak infeed Protection

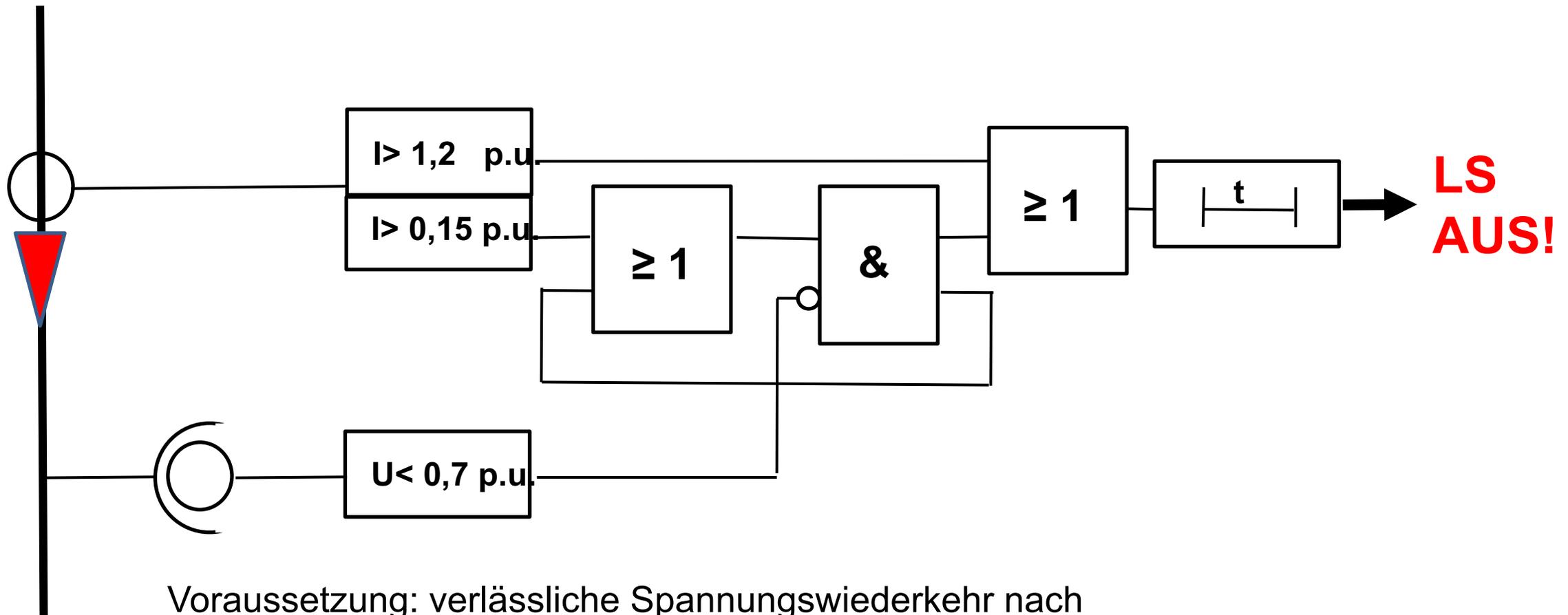
(Voltage Restrained Overcurrent Protection, 51R)



Voraussetzung:

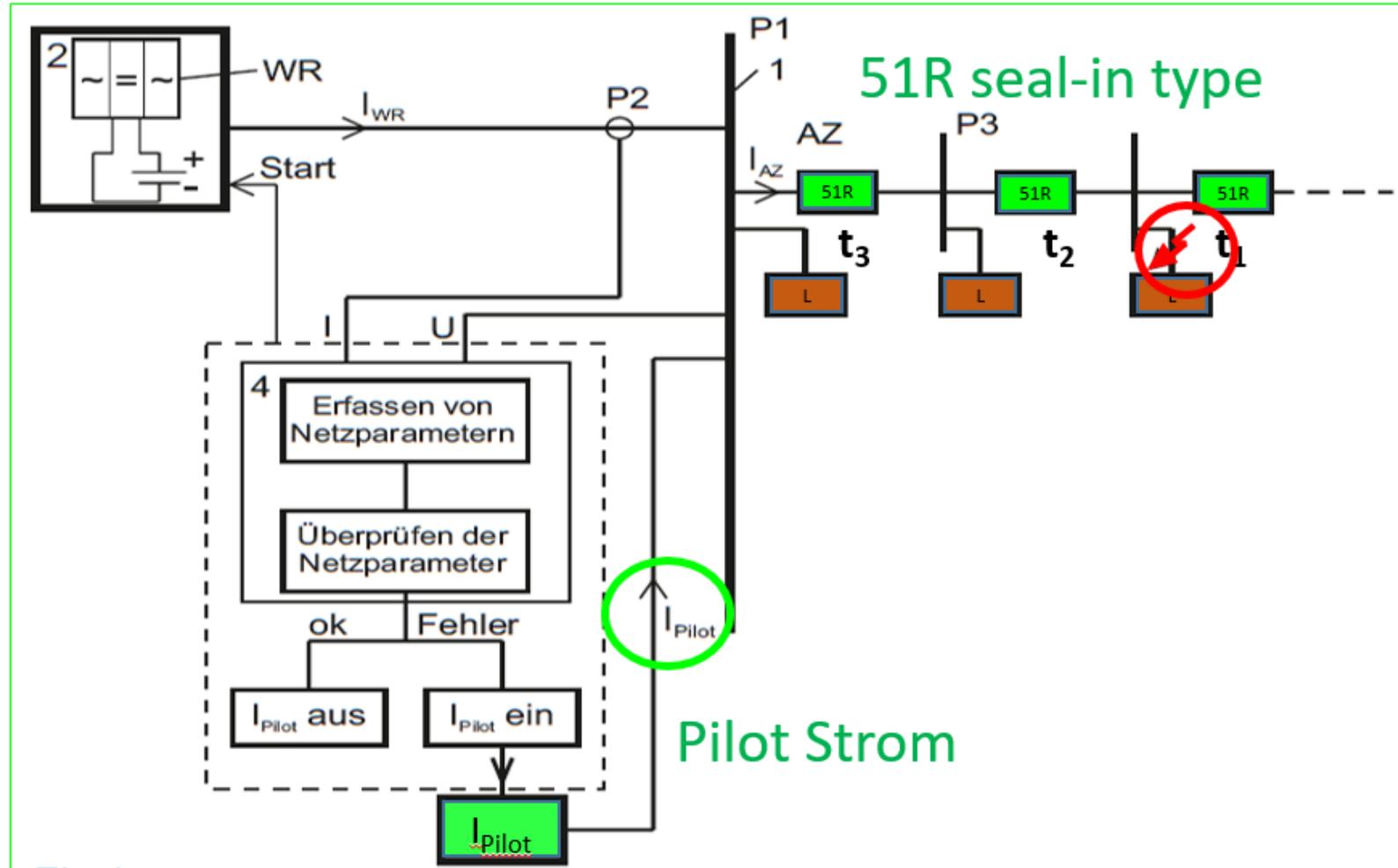
**Verlässliche Spannungswiederkehr nach Fehlerabschaltung =
bedingungsloses Low Voltage Ride Through (LVRT)-Verhalten
ausreichender Quellen im Netz.**

(Voltage Restrained Overcurrent Protection, ANSI = 51R), seal-in type



Voraussetzung: verlässliche Spannungswiederkehr nach Fehlerabschaltung = bedingungsloses Low Voltage Ride Through (LVRT)-Verhalten aller Quellen im Netz.

Weak infeed

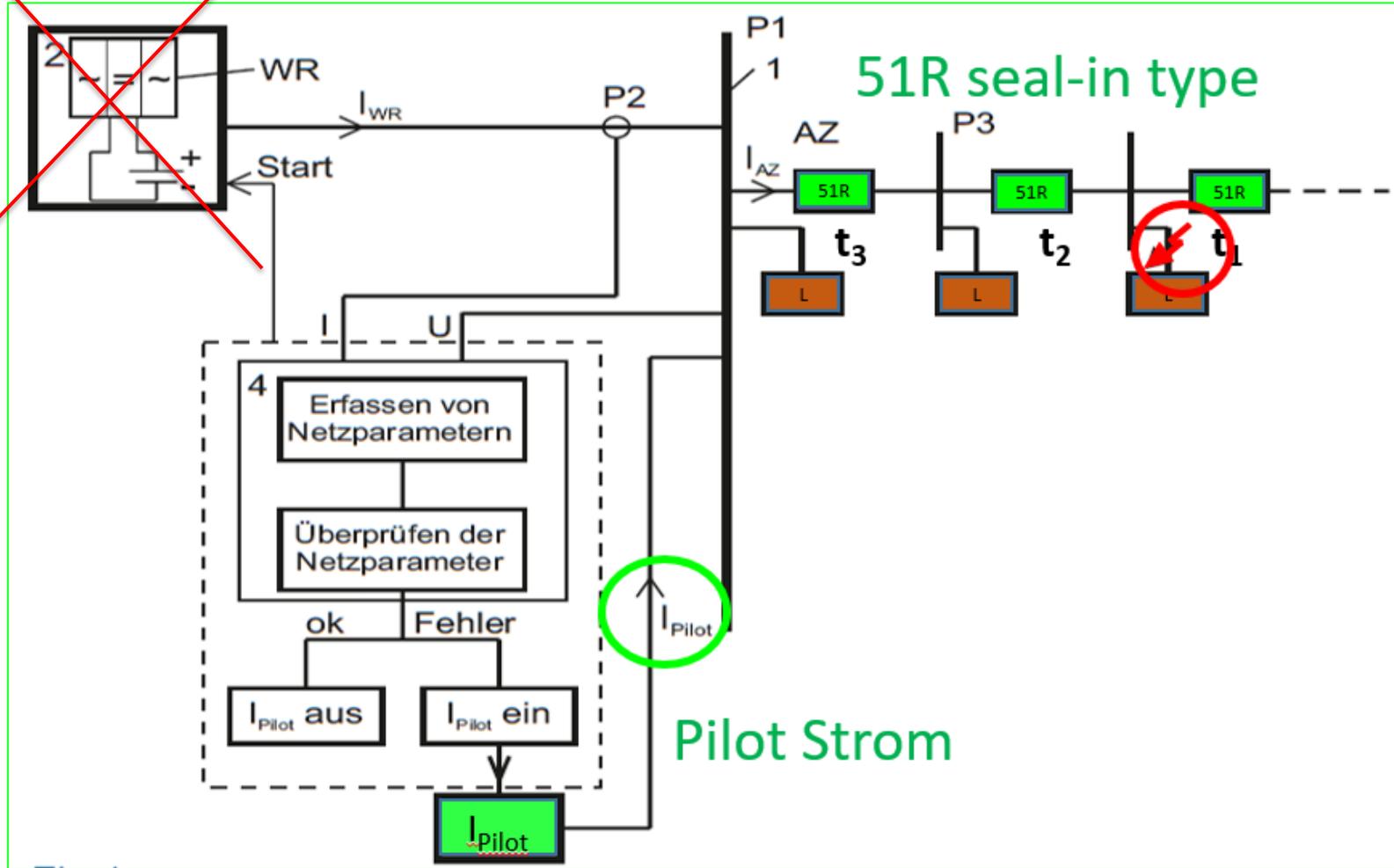


51R seal-in type

Pilot Strom

NEU

Weak infeed



NEU

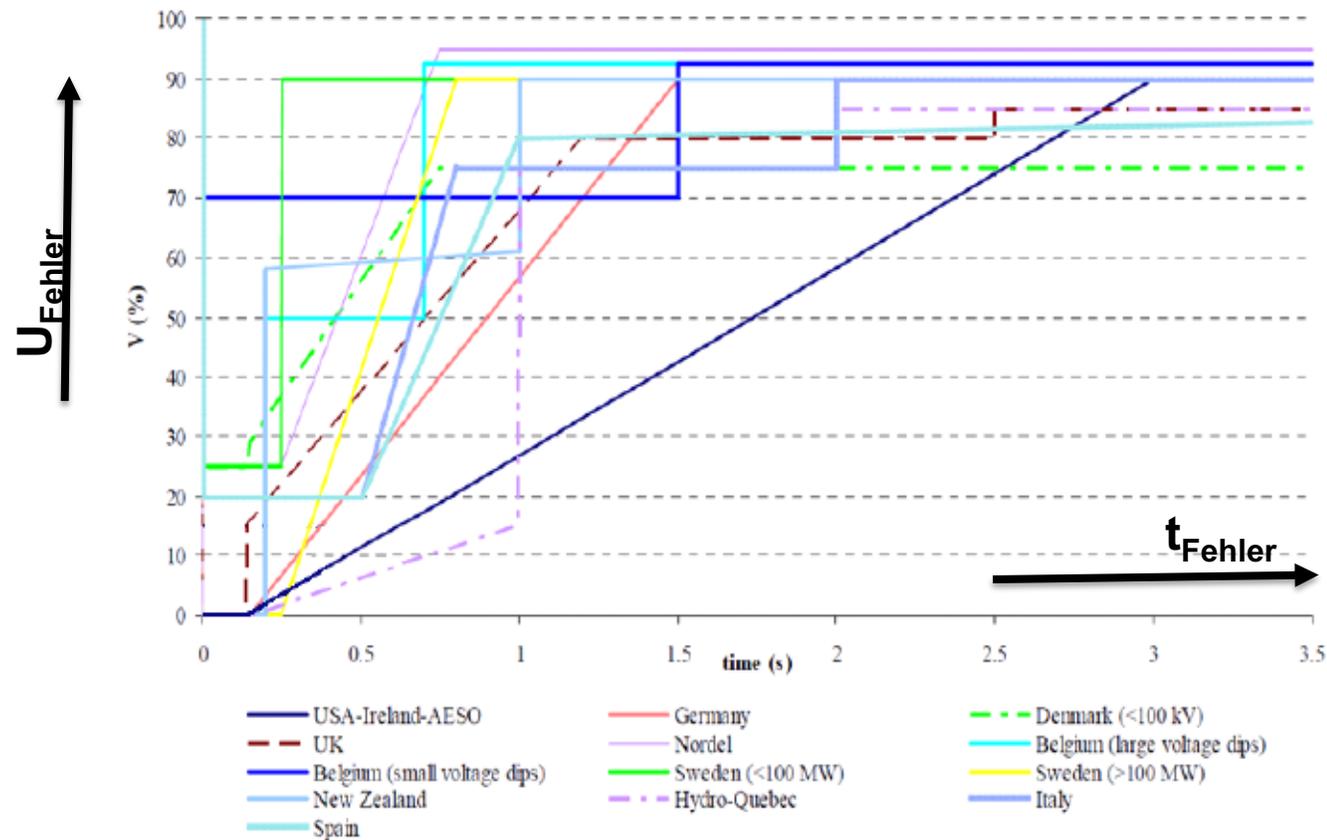
Umrüstungen (Schutzrelais) sind nötig.

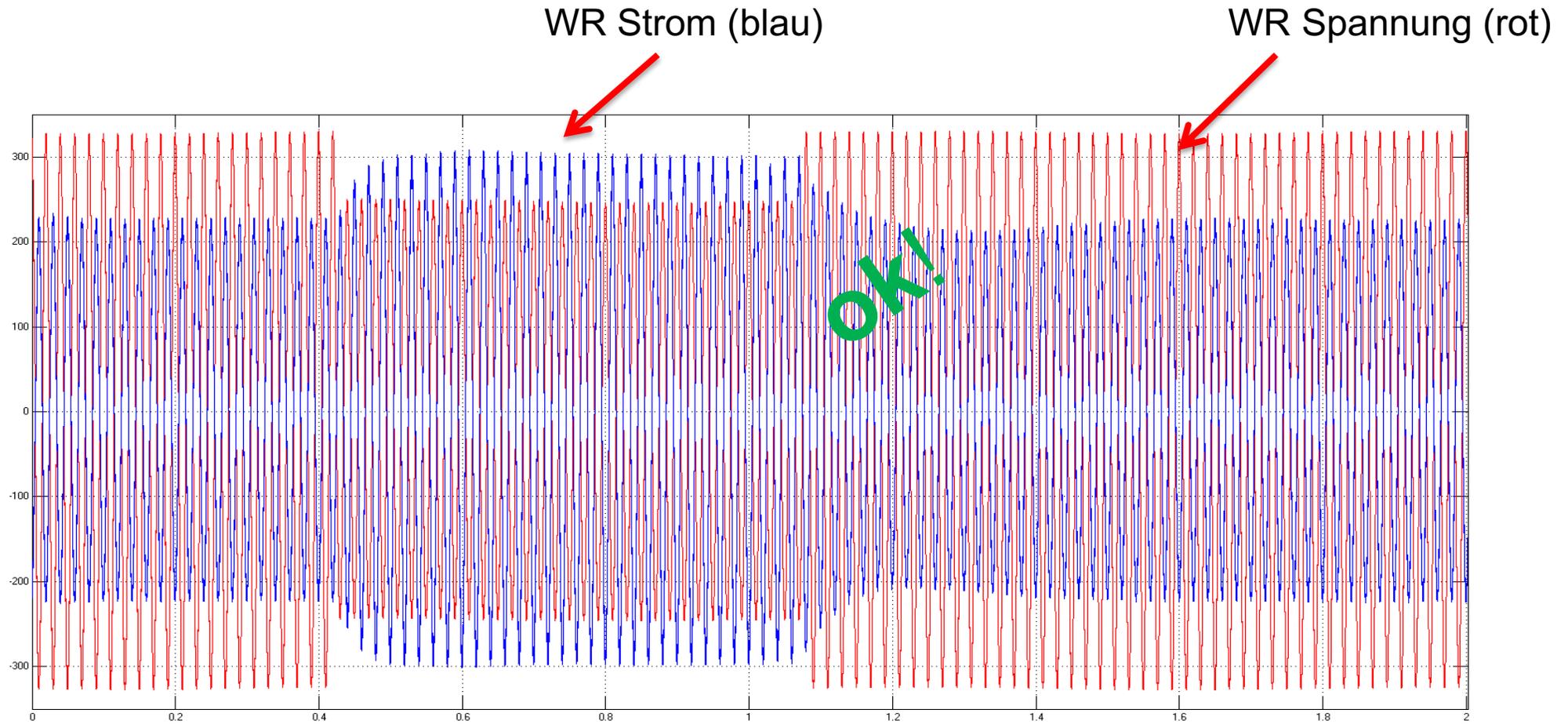
Stromeinspeisung gewisser Quellen ist sicherzustellen.

Low Voltage Ride Through (LVRT)-Verhalten geeigneter Quellen + Prüftechnik

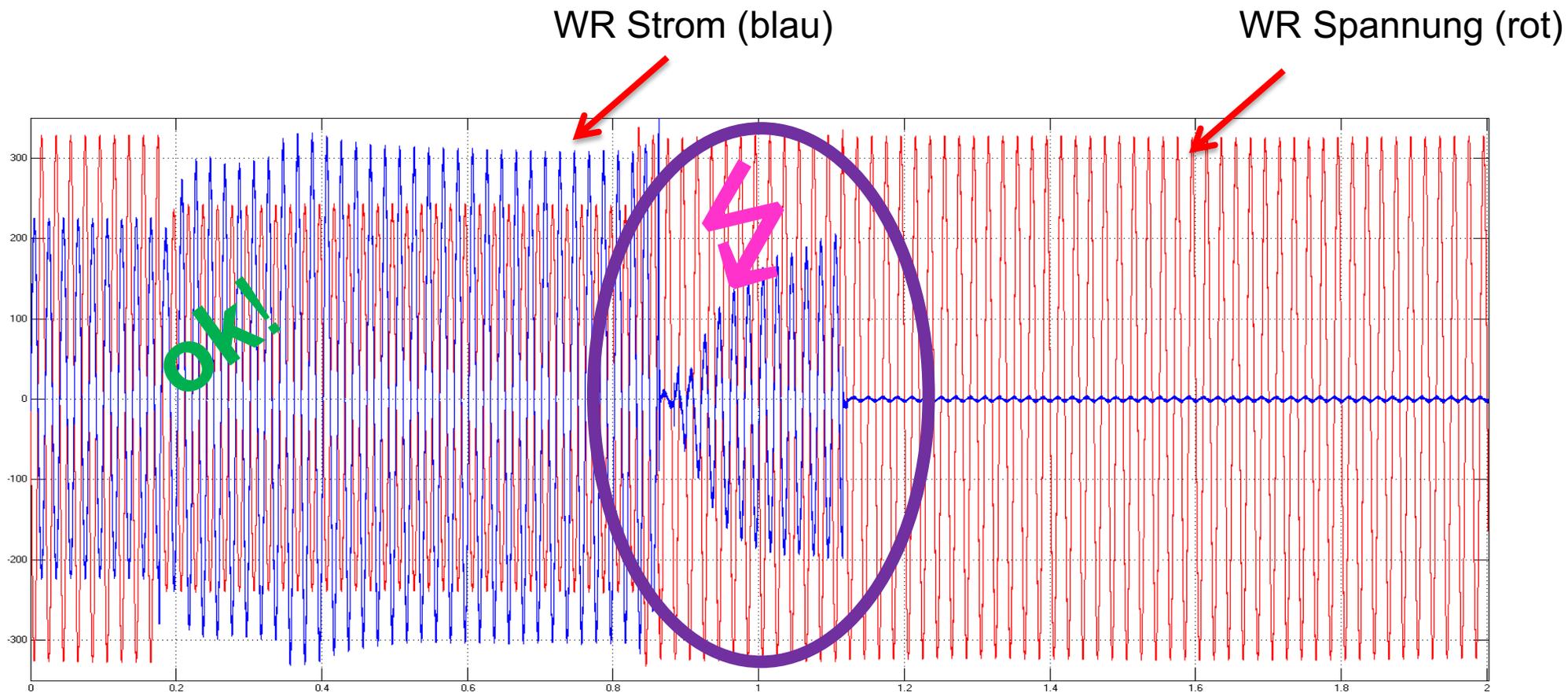
IEEE Std.1547-2003, «IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems»

World Wide FRT Withstand Curves

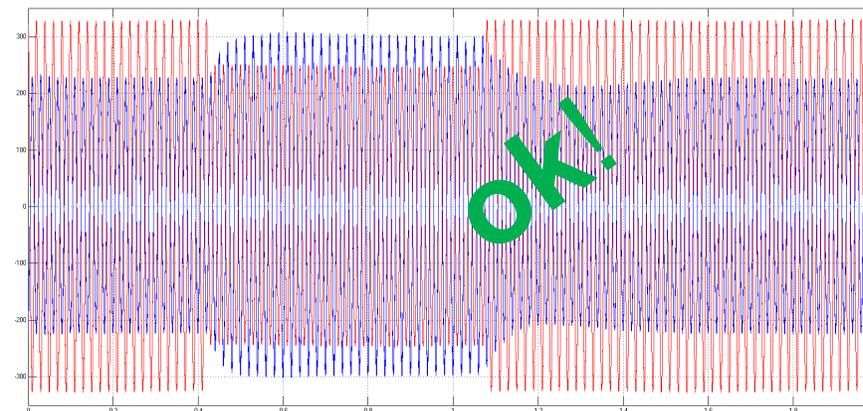
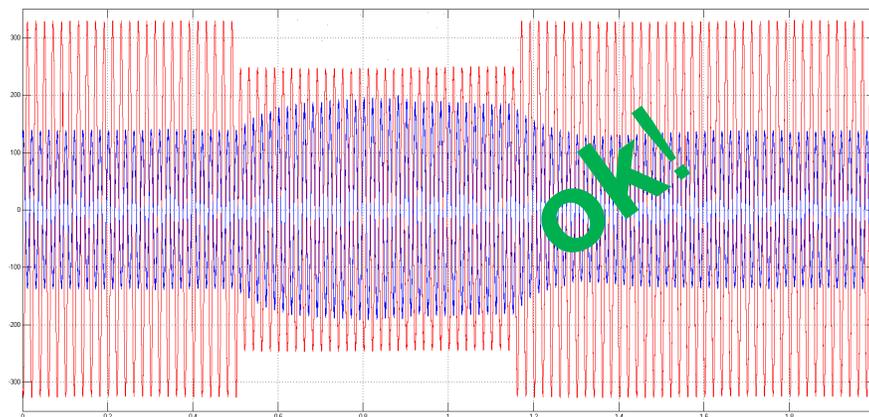




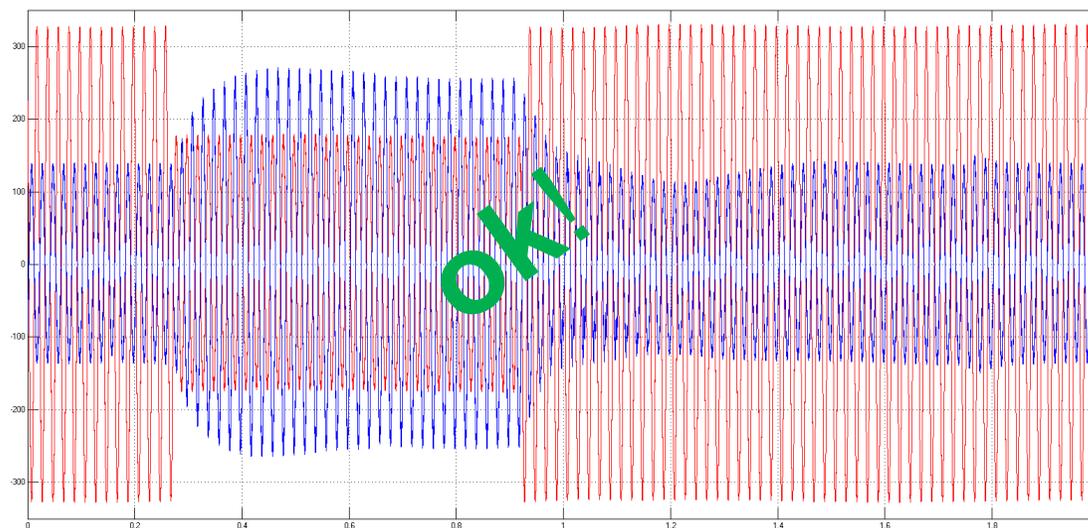
Verhaltens der Reglerstrukturen von Wechselrichtern als „cyberphysical systems“ ?!



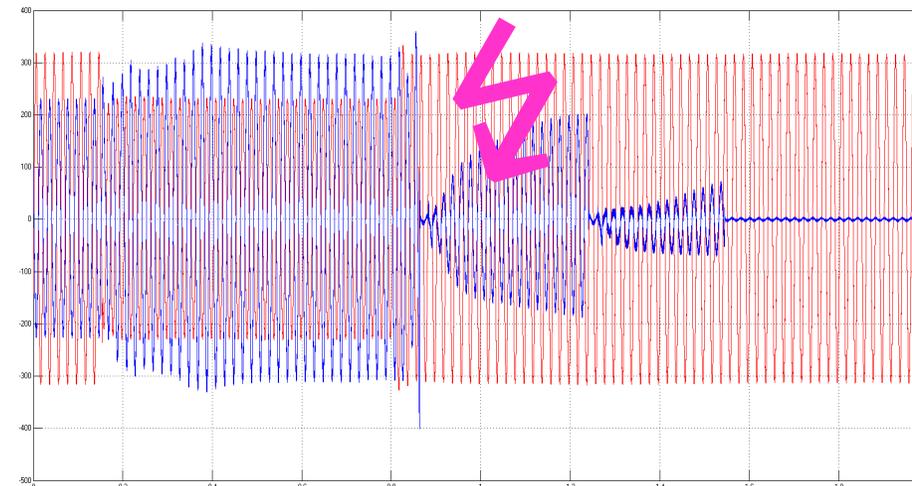
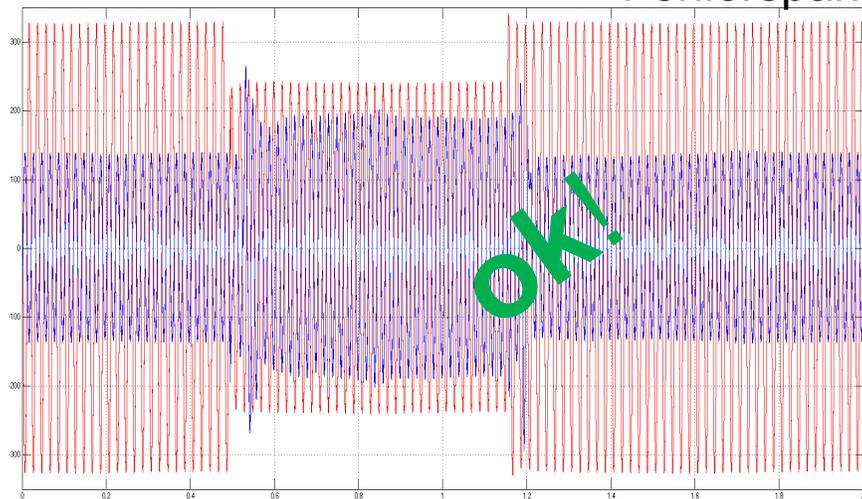
Fehlerspannung: 75%



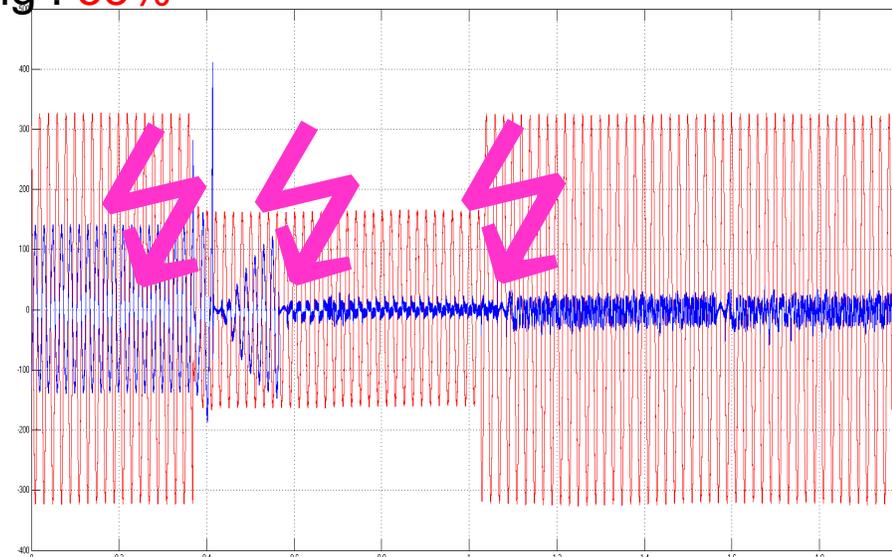
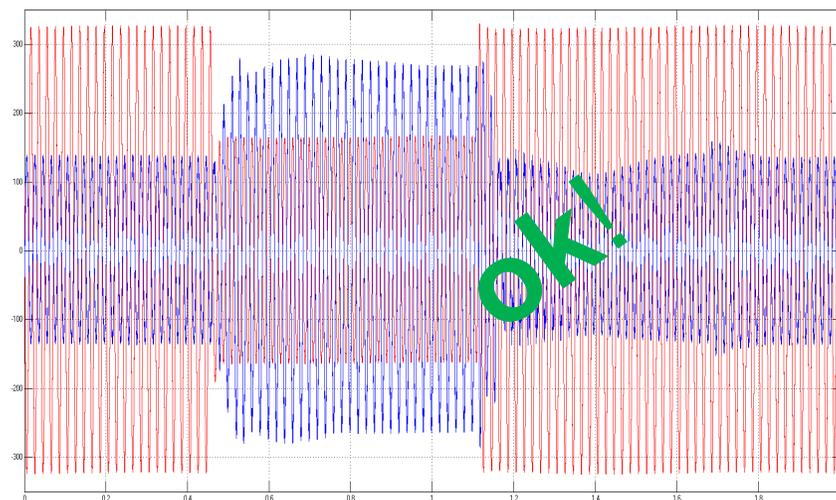
Fehlerspannung: 53%



Fehlerspannung : 75%



Fehlerspannung : 53%



FAZIT

- **Richtungs-Bestimmung**
- **Schneller Selektivschutz**
- **Weak infeed protection**
- **Bedingungsloses Low Voltage Ride Through (LVRT)-Verhalten geeigneter Quellen**

LVRT

- Zweckmäßige und sachkundige Spezifikation der Stromeinspeisung im Fehlerfall und in der Erholungsphase
- Einfordern eines Mindeststandards (Amplitude, Dauer, Phasenlage, Mit- / Gegen- / Nullsystem) → **Standardisierung?!**
- Korrekte Überprüfung, z.B. mittels
 - Power Hardware in the Loop (PHIL)
 - Controller Hardware in the Loop (CHIL)

SCHUTZTECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN FÜR ZUKÜNFTIGE NETZE UND MÖGLICHE LÖSUNGSPFADE

L. Fickert

E. Hufnagl