

**Neue Anforderungen an die Regelung
und das Kurzschlussverhalten
statischer Bahnstromumrichter
für die ÖBB Infra AG**

Markus Meyer (*emkamatik*), Georg Rader (ÖBB Infra)

Vortrag am ÖVG-Kongress Fahrstromanlagen, Wien, 8.11.2018

Inhalt

emkamatik

- 1** Einführung
- 2 Regelverhalten
- 3 Kurzschlussverhalten
- 4 Folgerungen

Ziel der Studie

emkamatik

Hintergrund:

- Systemstudie für den Ersatz von bestehenden Umformerwerken

Technisch:

- Wieviel Schwungmasse wird im ÖBB-Netz benötigt
- Wie müssen Netzkurzschlüsse durch Umrichter behandelt werden
- Abstimmung zwischen stationärem und schnellem transientem Verhalten
- Welche Zusammenhänge gibt es mit der Dimensionierung (Überlastbarkeit, Trafoimpedanz)

Projekte:

- Betrachtung herstellerneutral
- Anforderungen an den Umrichter als Input für die technische Spezifikation

Rotierende Umformer

emkamatik



Wimmis

Foto: Markus Meyer

Statische Umrichter

emkamatik



Wimmis

Foto: Markus Meyer

Bahnstromversorgung der ÖBB heute

emkamatik

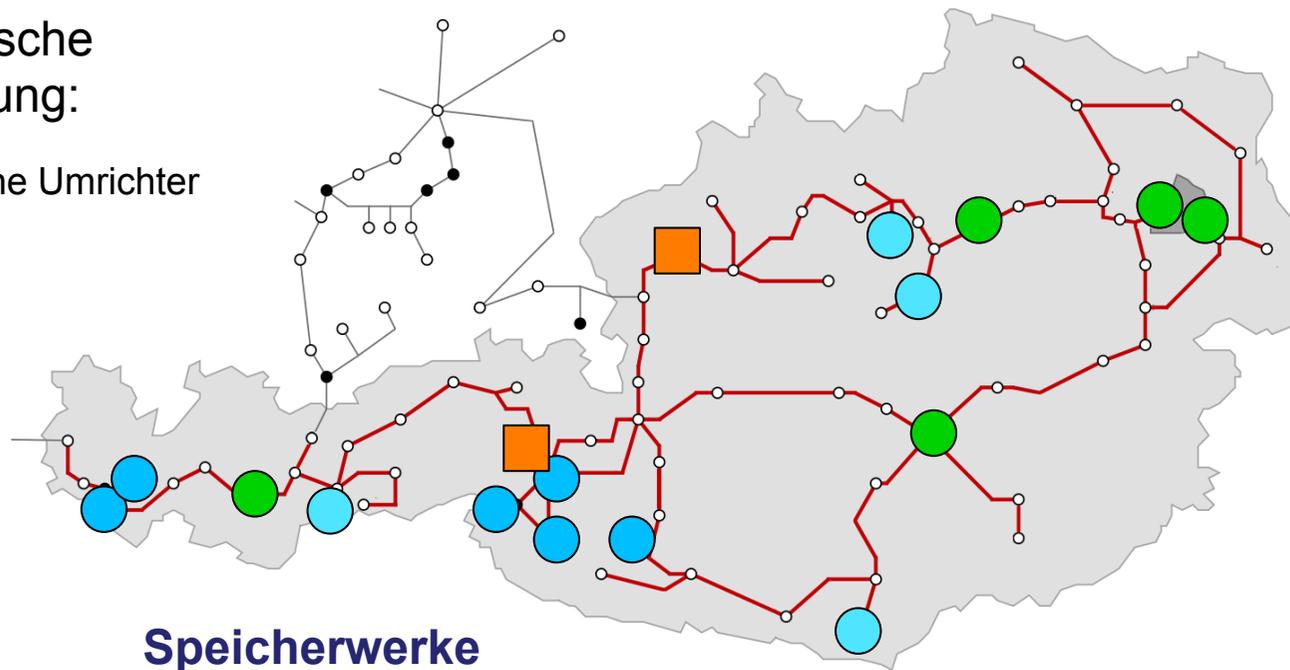
Synchronmaschinen:

- Wasserkraftwerk
- Rotierende Umformer

Elektronische
Einspeisung:

- Statische Umrichter

Laufwasserkraftwerke
(nicht immer in Betrieb)



← Synchronmaschinen landesweit verteilt →

Bahnstromversorgung der ÖBB langfristig

emkamatik

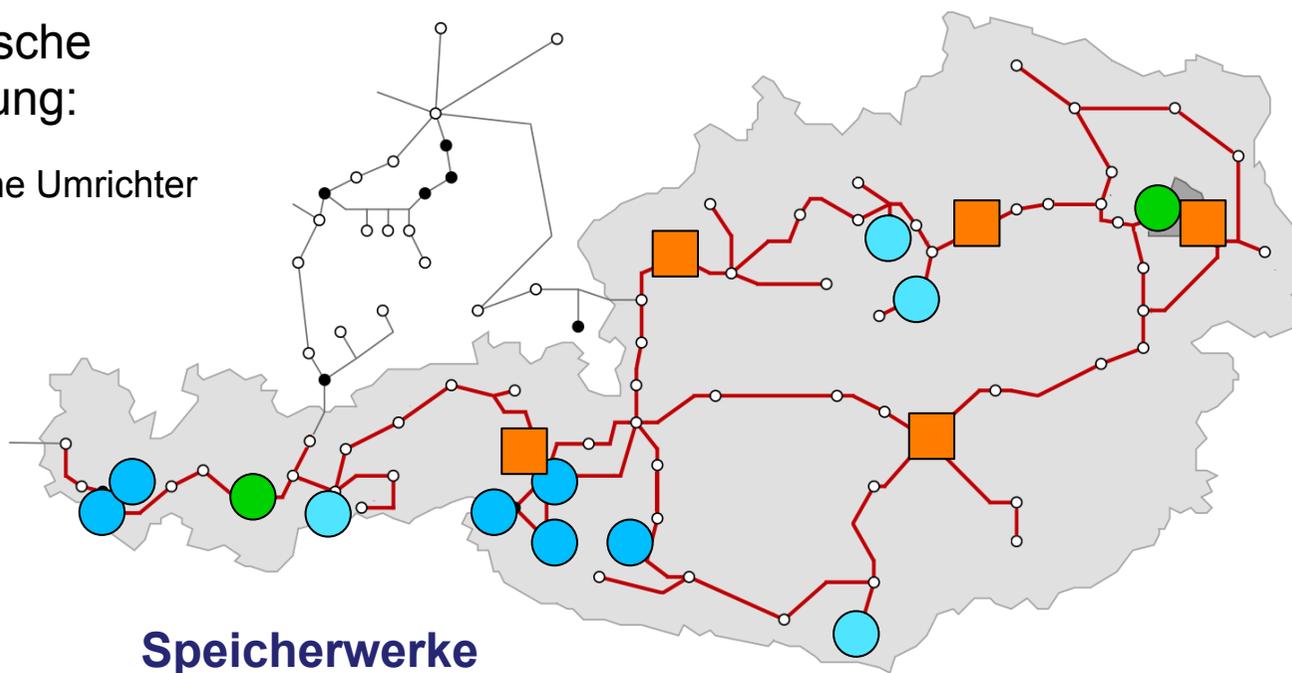
Synchronmaschinen:

- Wasserkraftwerk
- Rotierende Umformer

Elektronische
Einspeisung:

- Statische Umrichter

Laufwasserkraftwerke
(nicht immer in Betrieb)



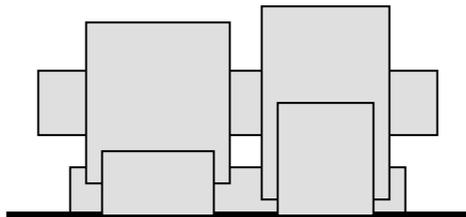
← Fast nur Umrichter im Osten →

Anforderungen – „ganz einfach“

emkamatik

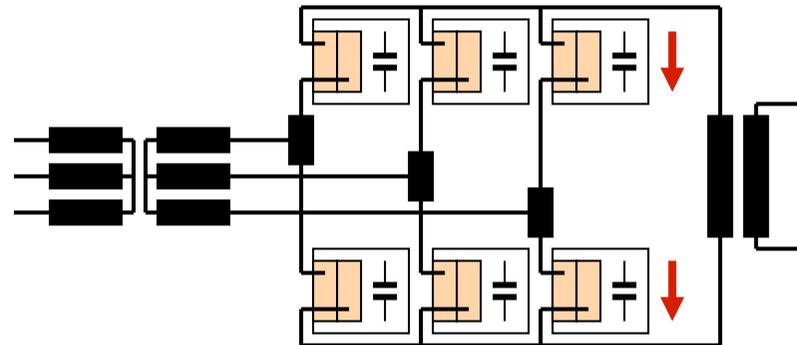
„Umrichter müssen sich verhalten wie eine Synchronmaschine“

Rotierende Umformer



!?
=

Statische Umrichter



Aber:

- Physikalischer Energiespeicher (Energienmenge relevant nur für die Regelung)
- Kurzzeitig stark überlastfähig
- Keine nennenswerte gespeicherte Energie
- Kaum überlastfähig

Was heisst das nun genau ?

emkamatik



Praterstern

Foto: Markus Meyer

Inhalt

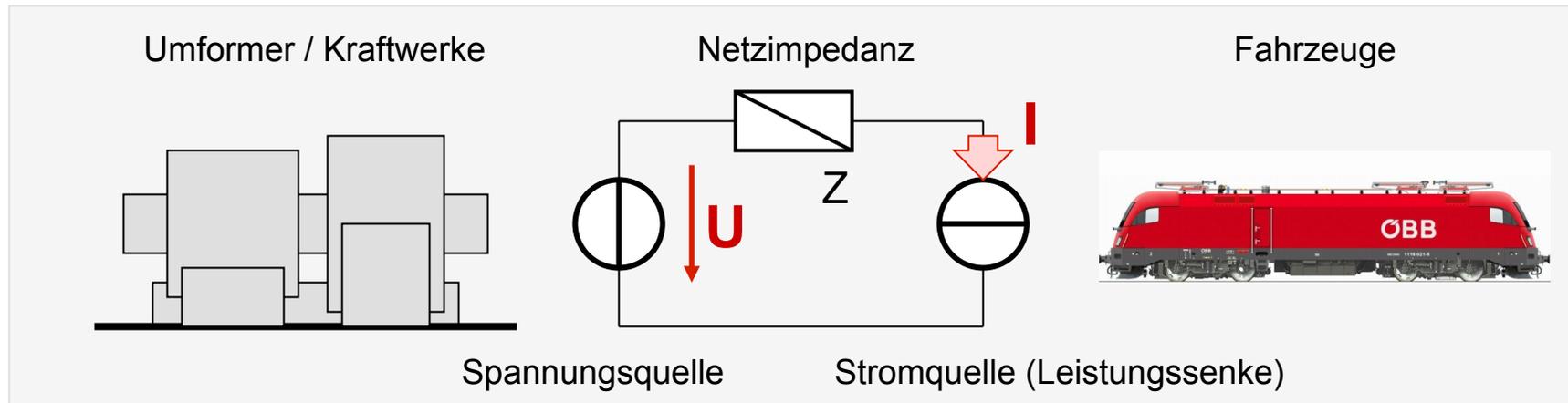
emkamatik

- 1 Einführung
- 2 Regelverhalten**
- 3 Kurzschlussverhalten
- 4 Folgerungen

Kritische Unterschiede im Systemverhalten

emkamatik

Zusammenschaltung von Quellen:



- Generator / Umformer / Umrichter muss als **Spannungsquelle** wirken
- Gespeicherte Energie (**rotierende Masse**) ist nur **regelungstechnisch** relevant

$$1 \text{ Umformer Kledering, } 40 \text{ MVA}$$
$$J * \omega^2/2 = 40.3 \text{ kWh} = 40 \text{ MW} * 4 \text{ s}$$

$$1 \text{ Railjet, } 6.4 \text{ MW am Rad}$$
$$m * v^2/2 = 40.4 \text{ kWh bei } 90 \text{ km/h !}$$

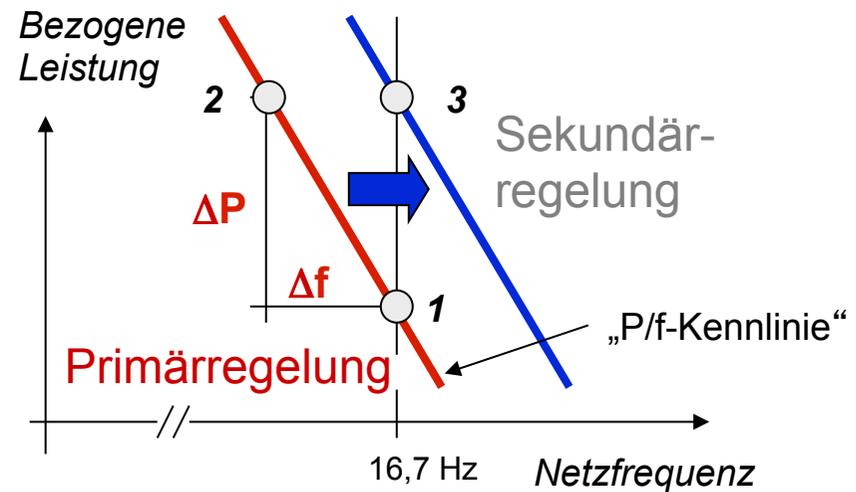
Strom- oder Spannungsführung

emkamatik

- Seit es elektrische Energieversorgungs-Netze gibt unverändert und bewährt
- Synchronmaschine als Spannungsquelle + Impedanz

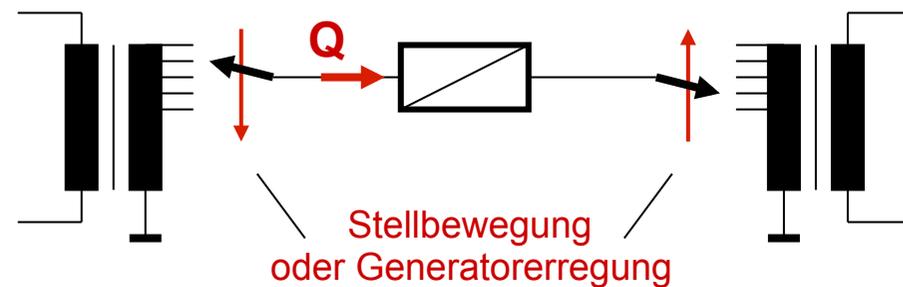
- Primärregelung

P/f



- Spannungsregelung

Q/U

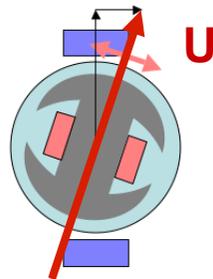


Grundidee für die Umrichterregelung

emkamatik

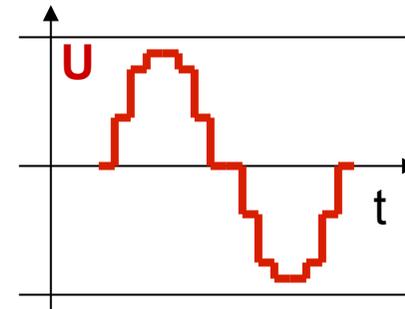
- Der Umrichter bildet eine „**Virtuelle Synchronmaschine**“
- Dazu wird insbesondere die **Bewegungsgleichung** der Maschine in der Umrichterregelung abgebildet
- Äquivalenzen:

Synchronmaschine



- Rotierende Masse
- Induzierte Spannung
- Erregung
- Polradwinkel
- Dämpferwicklung
- Längsreaktanz

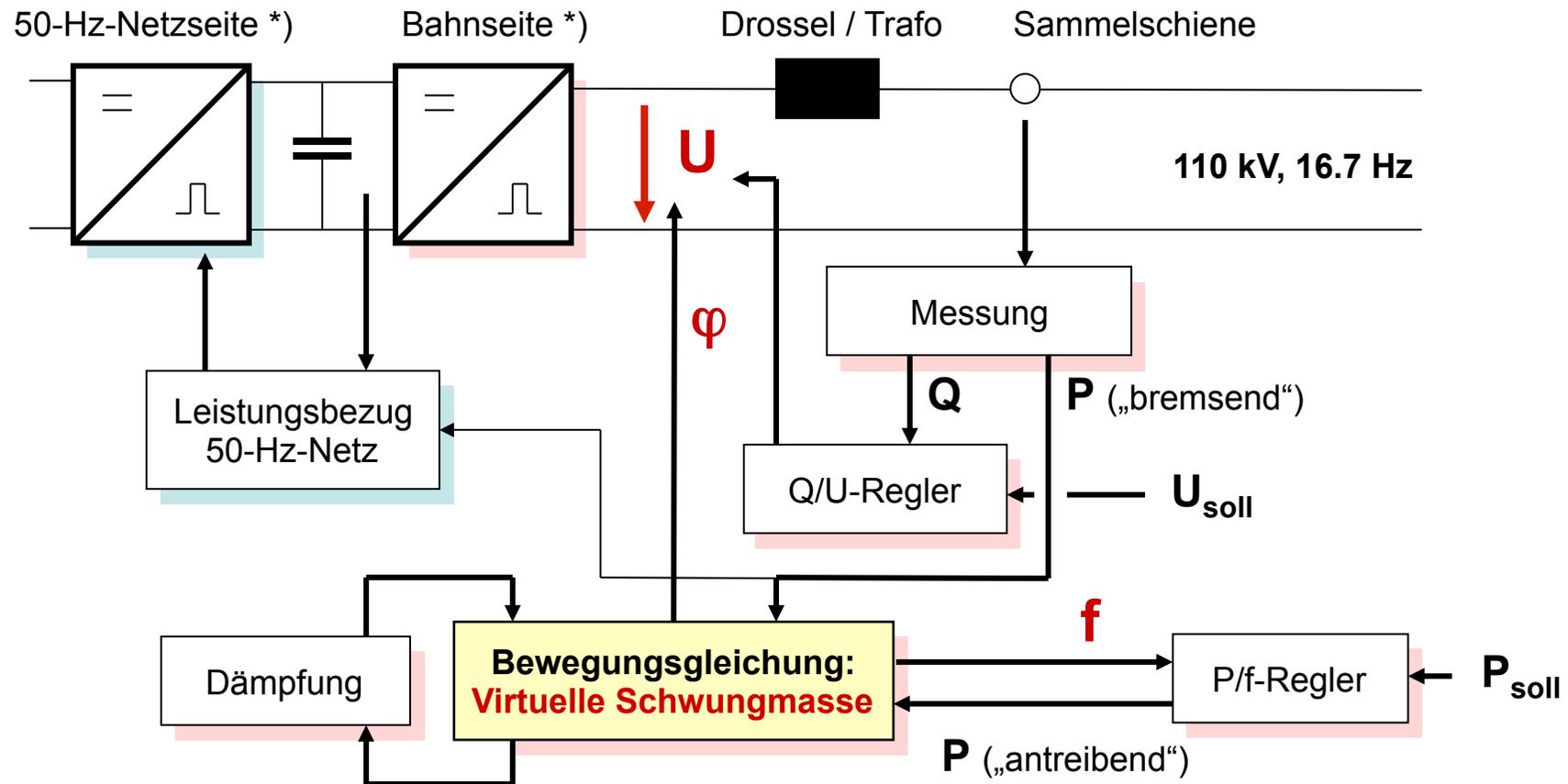
Umrichter (Bahnseite)



- Bewegungsgleichung
- PWM-Spannung
- Amplitude von U
- Phasenwinkel von U
- Dämpfungsalgorithmus
- Trafoimpedanz

Der Umrichter als Synchronmaschine

emkamatik



- *) Beim Direktumrichter:
- Hardware kombiniert
 - Regelung funktional überlagert

U, f, φ: interne Zustandsgrößen

Regelung: Analyse durch Simulation

emkamatik

Bsp: 2 parallele Umrichter mit unterschiedl. Impedanz

Lastsprung 50 MW

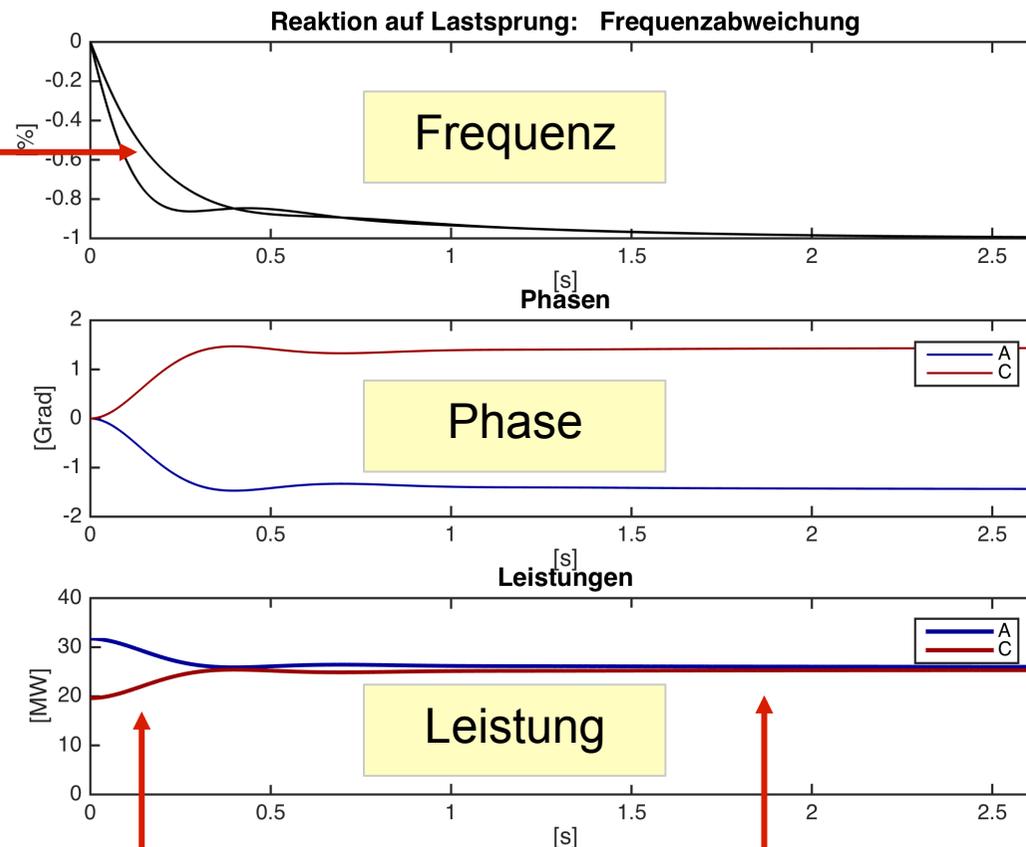
„Träge Reaktion“ df/dt :
einstellbar (Regelung)

Steilheit:

ca. **4 s** für

$\Delta P =$ Nennleistung und
 $\Delta f =$ Nennfrequenz

(wie bei rotierenden
Maschinen)



Transient unterschiedliche Leistungen
wegen ungleicher Impedanzen

Stationär gleiche Leistungen
dank gleicher P/f-Statik

Inhalt

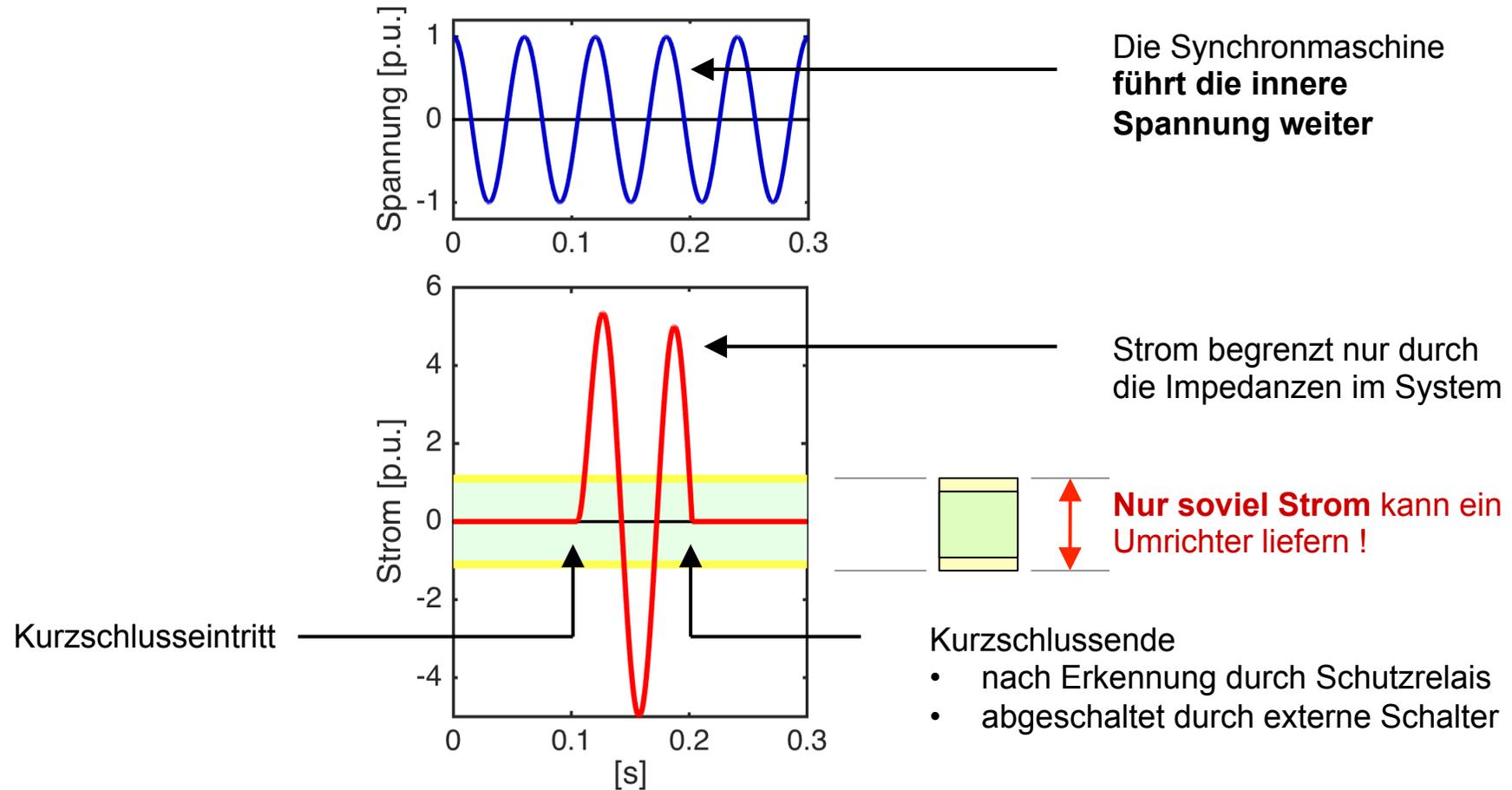
emkamatik

- 1 Einführung
- 2 Regelverhalten
- 3 Kurzschlussverhalten**
- 4 Folgerungen

Verlauf von Spannung und Strom bei Kurzschluss

emkamatik

Prinzipdarstellung für eine Synchronmaschine:



Kurzschluss-Konzept (1)

emkamatik

Quellenverhalten

- Wenn immer möglich als **Spannungsquelle**
- Aber: Schnelle **Strombegrenzung** zwingend nötig

Zeitliches Verhalten

- Abfolge von definierten **Zuständen**

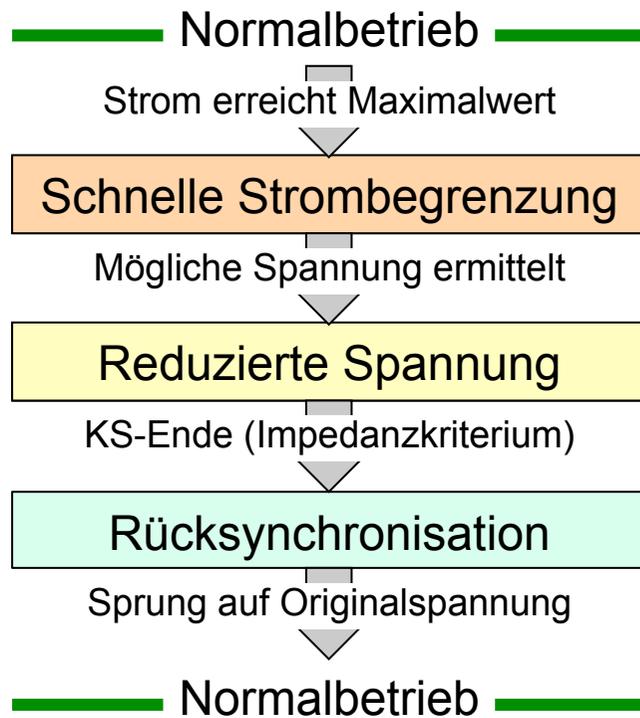
Verschiedene Stromgrenzen

	Bereich	Strom (Bsp.)	
	rot	> 130 %	Umrichterschutz
	orange	120 ... 130 %	Schnelle Strombegrenzung
	gelb	100 ... 120 %	Kurzzeit-Überlast ohne Regleränderung
	grün	\leq 100 %	Dauerbetrieb

Kurzschluss-Konzept (2)

emkamatik

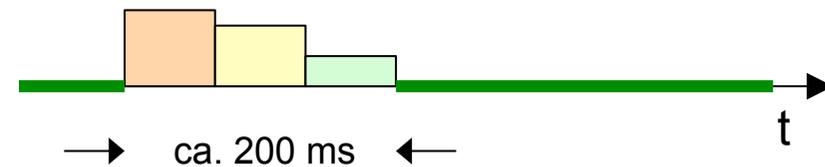
Übergänge zwischen den Zuständen:



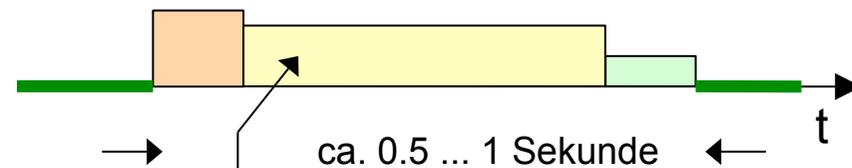
Zeitlicher Ablauf:

Zeitlicher Ablauf:

- schnelle Abschaltung



- späte Abschaltung, oder kurzzeitige Überlast



Länge wird bestimmt durch das Netz
(Art des Ereignisses)

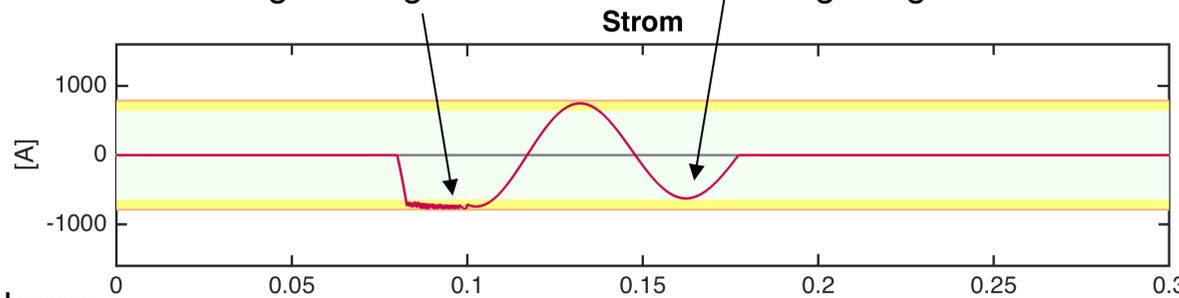
Zeitverläufe: leerlaufendes Netz

emkamatik

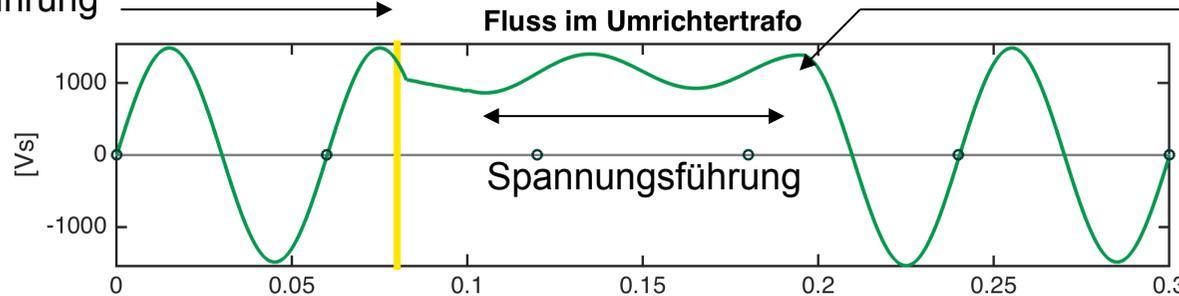
Zustände:

Schnelle Strombegrenzung

Einregelung auf Sinusform (über Spannung)

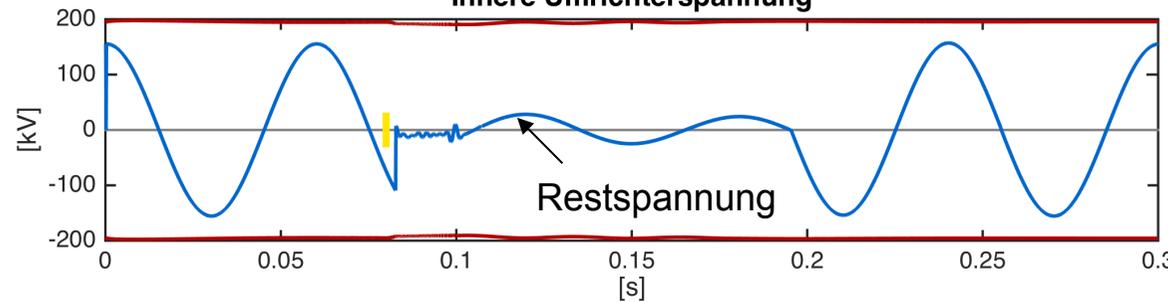


Flussführung



Wieder-Synchronisation auf Fluss

Innere Umrichterspannung

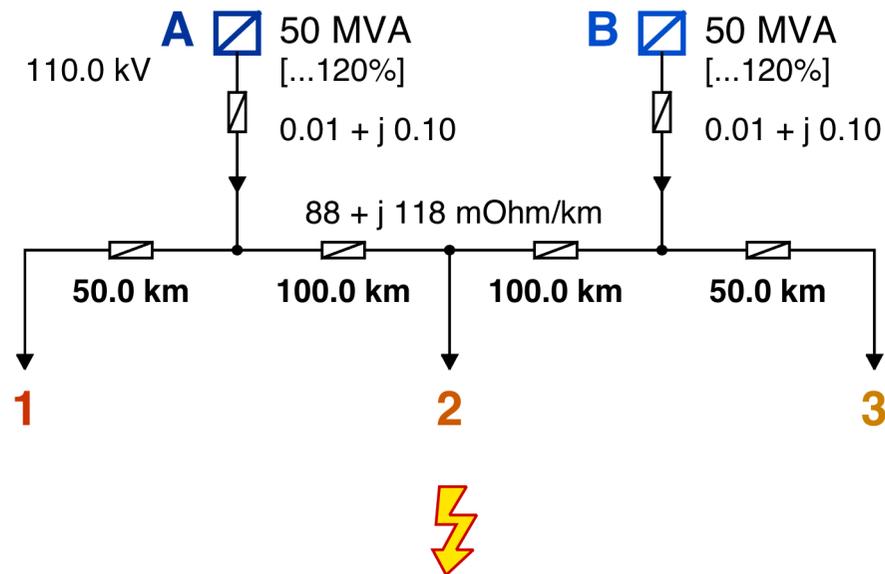


Simulationen

emkamatik

Parametrierbare Modellnetze mit

- 2 Einspeisungen:
 - Umrichter (Bewegungsgleichung, Kurzschlusskonzept)
 - oder Synchronmaschinen (beliebig kurzzeitig überlastbar)
- Nahe und entfernte Kurzschlussorte

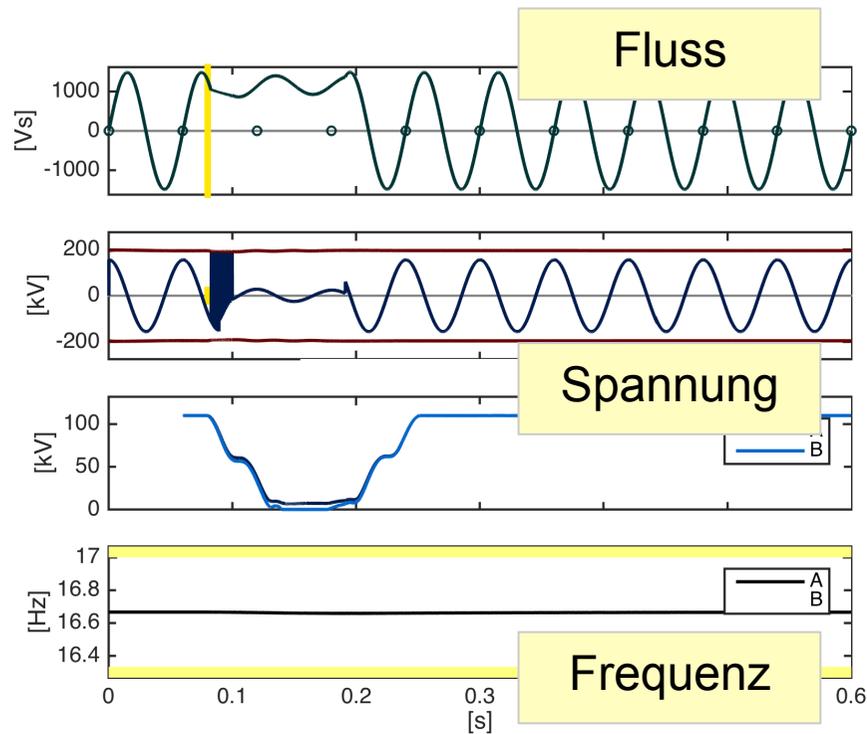


Parameter: Beispiele

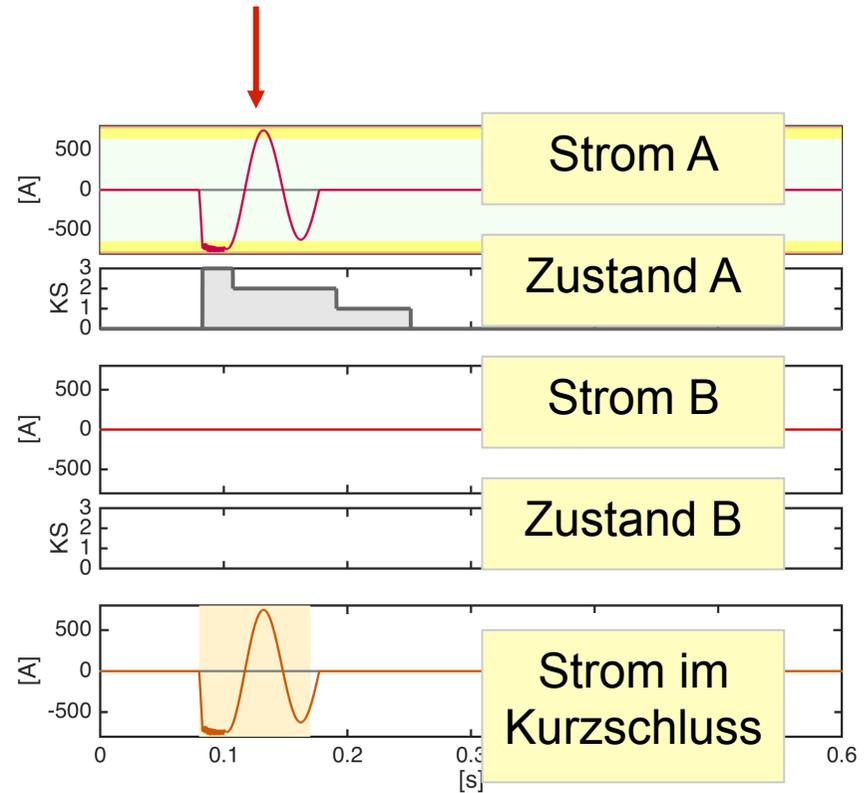
Einfacher Kurzschluss

emkamatik

„Auslegungsfall“



Nur hier theoretisch durch Stromregelung möglich, aber die Realität kann beliebig viel komplexer sein

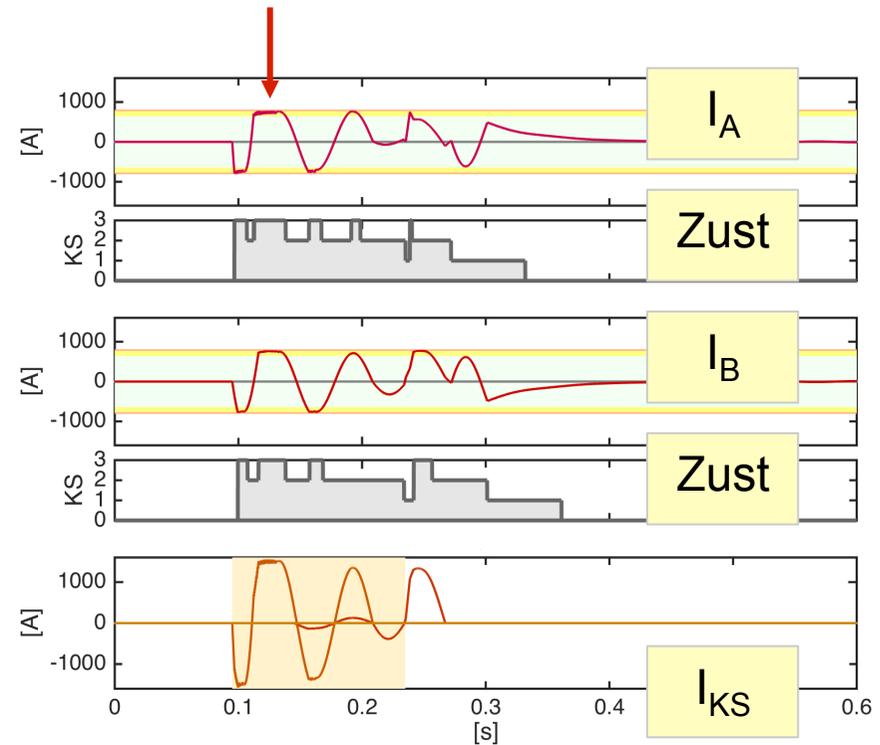
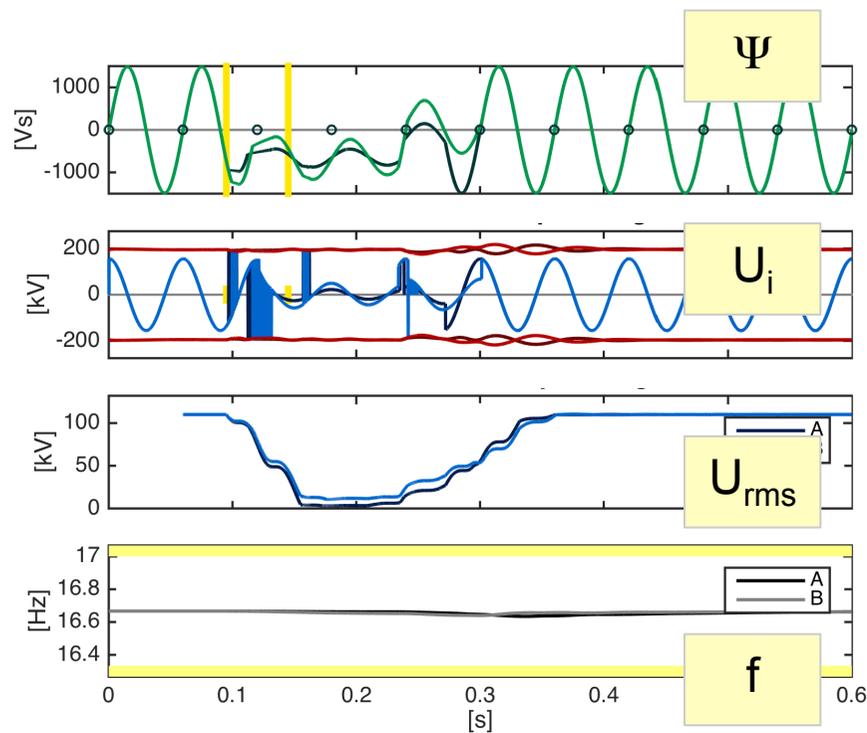


Mehrfachkurzschluss

emkamatik

Ein Kurzschluss verdeckt zunächst einen späteren, zweiten

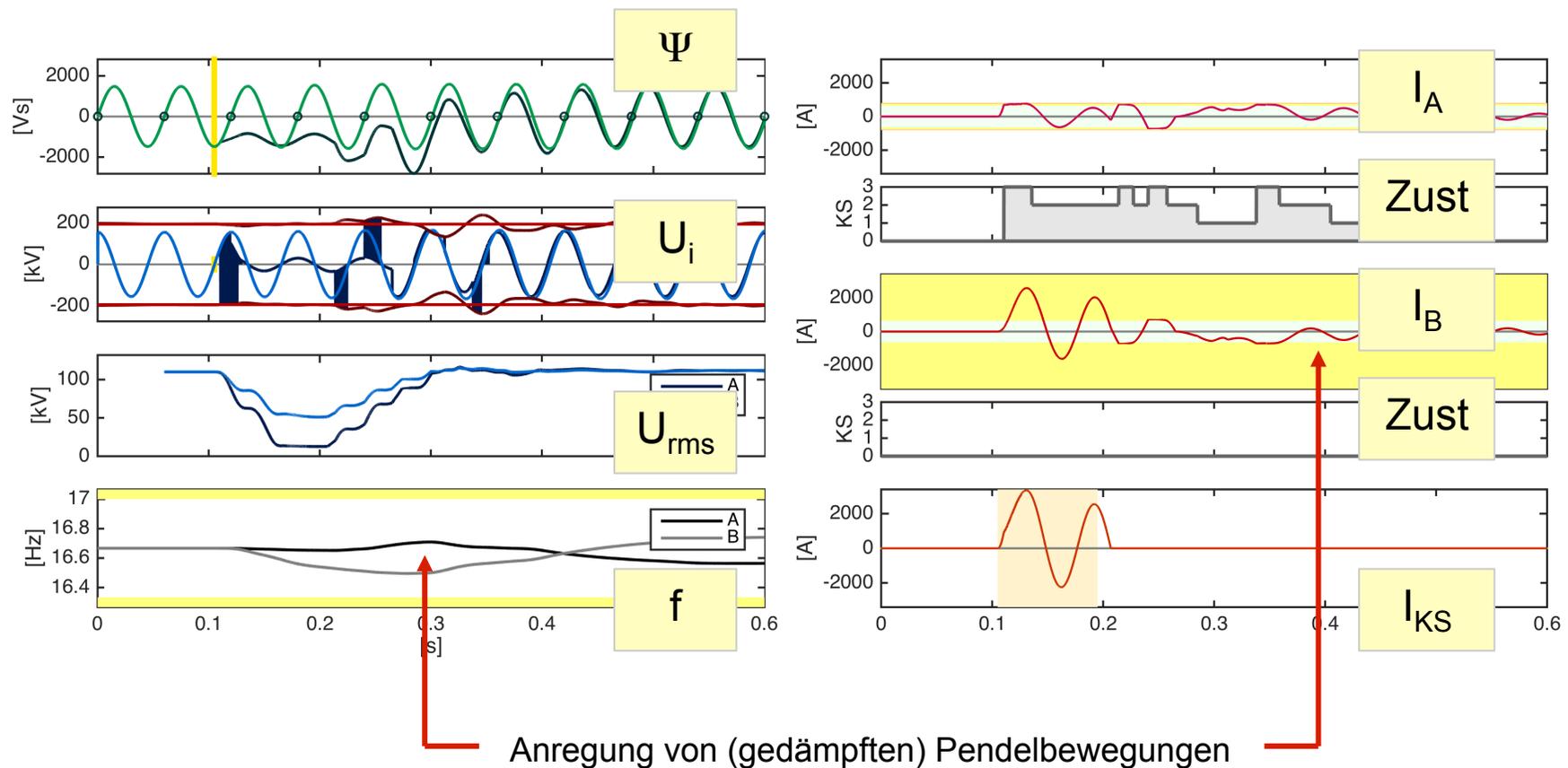
Überlagerung von Stromverläufen



Parallelschaltung von Umrichtern und Synchronmaschinen

emkamatik

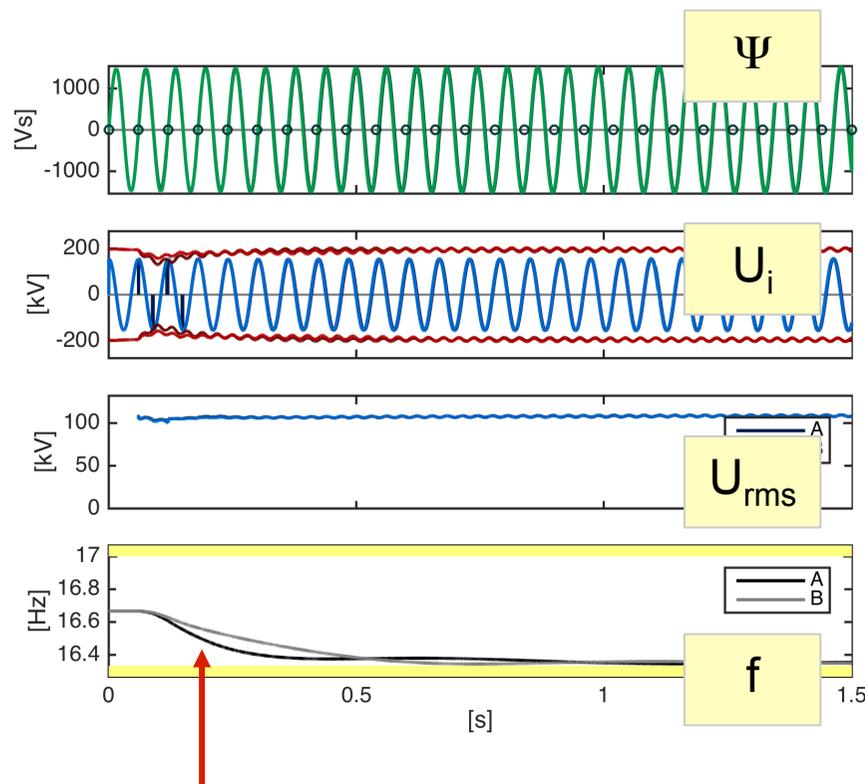
Die Parallelschaltung muss ohne Konzept- und Parameterumschaltung im Umrichter jederzeit möglich sein



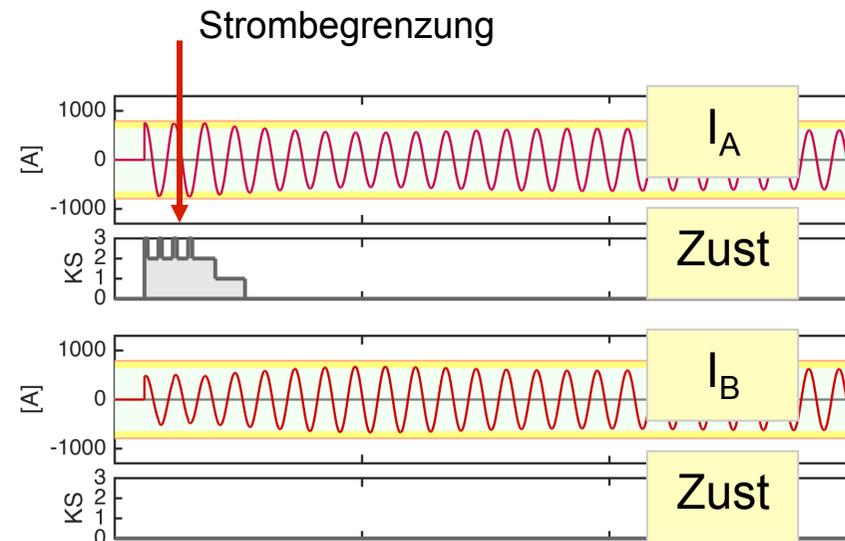
Transiente Überlast

emkamatik

Wegen der Spannungsführung kann bei starken Laststößen eine kurzzeitige Strombegrenzung nötig sein; die Bewegungsgleichung läuft weiter !



„Trägheit“ jederzeit vorhanden



... Konzepte und Schnittstellen geklärt

emkamatik



Praterstern

Foto: Markus Meyer

Inhalt

emkamatik

- 1** Einführung
- 2** Regelverhalten
- 3** Kurzschlussverhalten
- 4** **Folgerungen**

Folgerungen

emkamatik

Technisch:

- Das Konzept funktioniert (Nachweis durch die Systemstudien)

Umrichter-Projekte:

- Das Konzept (Regelung, Kurzschlussverhalten) wird vorgegeben
- Es ist direkt oder durch ein äquivalentes Klemmenverhalten umzusetzen
- Nachweis in verschiedenen Schritten:
 - Offline-Simulation
 - Echtzeitsimulation
 - Anlage

Triebfahrzeuge:

- Das Verhalten bei Netzkurzschlüssen ist anzupassen
- Gründe:
 - Abstimmung mit dem Verhalten am schwachen Netz
 - Nicht-Überlastbarkeit der Umrichter (sehr tiefe Restspannung)

Literaturhinweise

emkamatik

Die beiden Umrichterstudien für die ÖBB (Reglerstudie, Kurzschlussstudie) sind publiziert. Dort sind viele Details erklärt, die in diesem kurzen Vortrag zwangsläufig zu kurz kommen:

[1] Meyer, M, Rader, G.:

Konzept für die Nachbildung der Schwungmasse in der Regelung statischer Frequenzumrichter.

Elektrische Bahnen 10/2017

[2] Meyer, M, Rader G.:

Anforderungen an das Kurzschlussverhalten statischer Bahnnetzumrichter.

Elektrische Bahnen 6/2018

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit !

emkamatik



Raxalpe

Foto: Markus Meyer