



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



ELEKTRISCHE
BAHNEN

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik, Professur Elektrische Bahnen

Netzstabilität beim Einsatz von Umrichtern in der Bahnstromversorgung

Dipl.-Ing. Christoph Pache
Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

Symposium Fahrstromanlagen Wien, 08./09. November 2018



DRESDEN
concept
Exzellenz aus
Wissenschaft
und Kultur



Inhalte

- 1. Erzeugerparkwechsel in der Bahnstromversorgung**
- 2. Aspekte der Netzstabilität**
- 3. Netzsimulation mit Umrichtern**
- 4. Fazit und Ausblick**



Inhalte

- 1. Erzeugerparkwechsel in der Bahnstromversorgung**
- 2. Aspekte der Netzstabilität**
- 3. Netzsimulation mit Umrichtern**
- 4. Fazit und Ausblick**

1. Erzeugerparkwechsel Bahnstromversorgung Ausgangslage

Zentrale Bahnenergieversorgung:

- Umstellung des Erzeugerparks seit Mitte der 1990er Jahre
 - 16,7-Hz-Maschinen sind ineffizient und teuer
 - Netzkupplungsumrichter sind inzwischen eine verfügbare wirtschaftliche Alternative
 - aktuell in Deutschland über 50 % der installierten Erzeugerleistung statisch durch Umrichter
 - mittelfristig Entfall aller thermischen Kraftwerke
 - bei Teilnetzbildung kann schon heute vollständige Umrichterspeisung auftreten
- Forschungs Kooperation TU Dresden und DB Energie (2013 bis 2017)

Rotierende Maschinen



Statische Frequenzumrichter





1. Erzeugerparkwechsel Bahnstromversorgung Umrichter am 2 AC 16,7Hz-Bahnstromnetz (D, CH, AT)

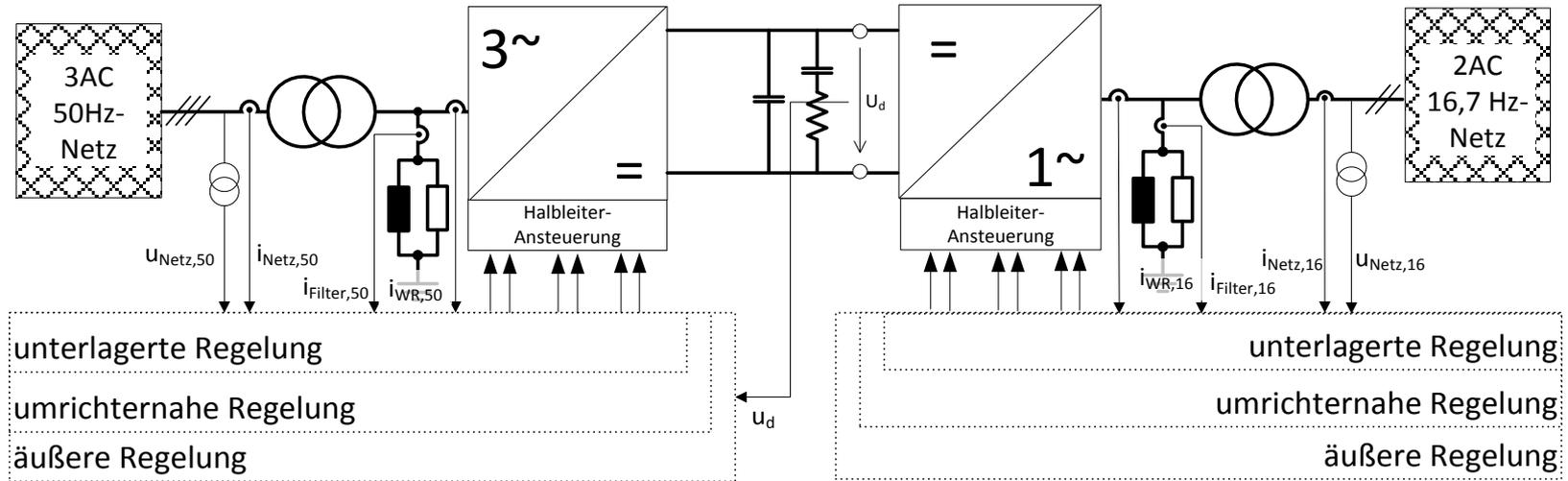
Standort	Land	Hersteller	$P_{\text{Nenn, 16,7Hz}}$ [MW]	Inbetriebnahme	Technologiekonzept
Giubiasco	CH	ABB	40	1994	Großumrichter
Bremen	DE	ABB	80	1996	Großumrichter
Karlsfeld	DE	ABB	100	1999 - 2000	Großumrichter
Düsseldorf	DE	ABB / Alstom	30	2000	Standard-Umrichter
Limburg	DE	ABB	120	2002	Standard-Umrichter
Thyrow	DE	Areva / Converteam (GE)	120	2004 - 2007	Standard-Umrichter
Bever	CH	ABB	18	2004	Modifizierung Standardumrichter
Landquart	CH	ABB	18	2005	Modifizierung Standardumrichter
Wimmis	CH	ABB	80	2005	Modifizierung Standardumrichter
Timelkam	AT	ABB	60	2009	Modifizierung Standardumrichter
Aschaffenburg	DE	Converteam (GE)	64	2010	Modifizierung Standardumrichter
Lehrte	DE	Converteam (GE)	64	2010	Modifizierung Standardumrichter
Köln	DE	Converteam (GE)	75	2011	Modifizierung Standardumrichter
Neckarwestheim	DE	ABB	150	2011	Modifizierung Standardumrichter
Nürnberg	DE	SIEMENS	60	2012	Multi-Level-Umrichter
Bremen	DE	ABB	120	2013	Modifizierung Standardumrichter
Mannheim	DE	GE	120	2013	Modifizierung Standardumrichter
Datteln	DE	ABB	404	2014	Modifizierung Standardumrichter
Uttendorf	AT	SIEMENS	48	2014	Multi-Level-Umrichter
Neumünster	DE	ABB	70	2015	Modifizierung Standardumrichter
Winkeln	CH	SIEMENS	120	2015	Multi-Level-Umrichter
Summe			1961		

→ **ausgeprägte Anlagenvielfalt**

1. Erzeugerparkwechsel Bahnstromversorgung

Technische Besonderheiten

Beispiel Zwischenkreisumrichter



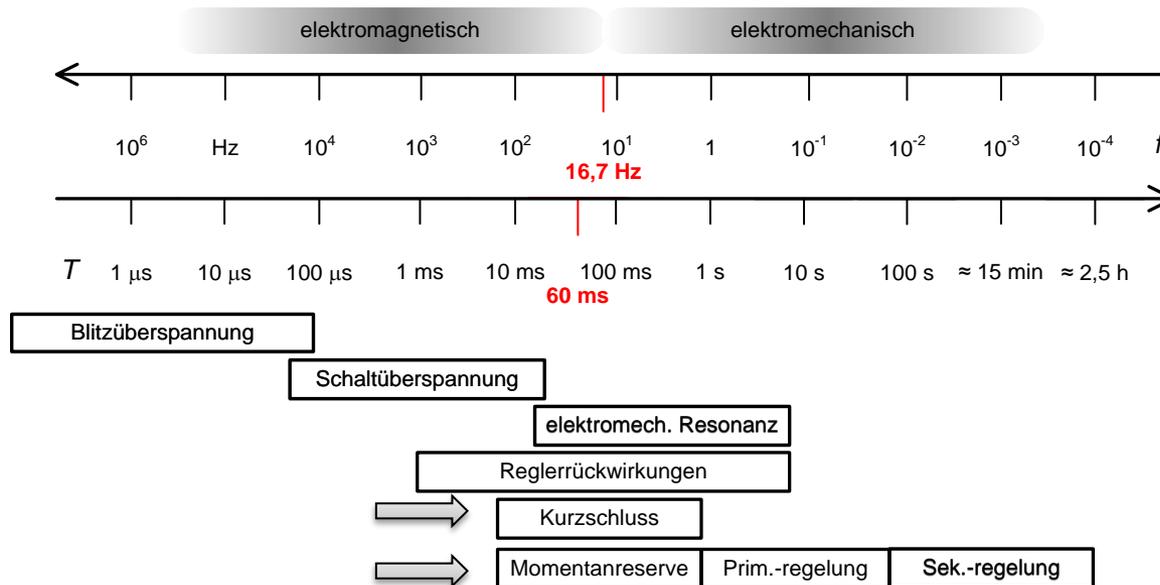
- geregelte leistungselektronische Schaltung, d.h. kein inhärentes Maschinenverhalten ($n \sim P, I_K$)
- Halbleiterbauelemente sind stationär nicht überlastbar
- Transformator und Filter sind i.d.R. Sonderbauformen



Inhalte

1. Erzeugerparkwechsel in der Bahnstromversorgung
- 2. Aspekte der Netzstabilität**
3. Netzsimulation mit Umrichtern
4. Fazit und Ausblick

2. Aspekte der Netzstabilität Ausgleichsvorgänge im Bahnstromnetz

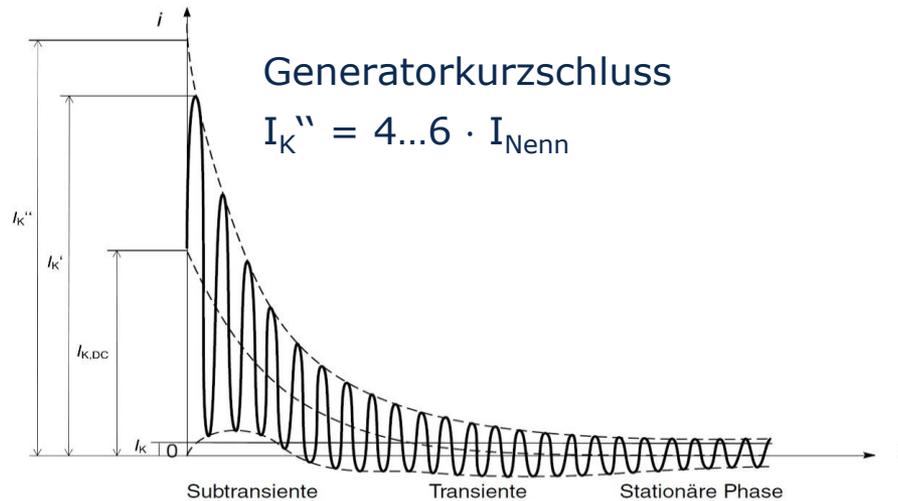


Ausgangsfragen:

- Sind Umrichter in der Lage, sich in das bestehende Schutzkonzept der zentralen Bahnenergieversorgung zu integrieren → **Thema Schutz**
- Ist die Frequenz-Wirkleistungsregelung der zentralen Bahnstromversorgung durch flächendeckende Umrichterspeisung beeinträchtigt? → **Thema Netzregelung**

2. Aspekte der Netzstabilität

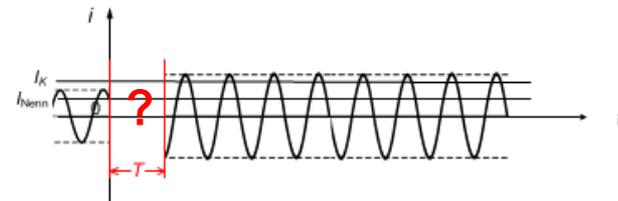
Netzschutz unter Umrichterspeisung



Umrichter Kurzschluss:

$$I_K = 1,0 \dots 1,2 \cdot I_{nenn}$$

(abh. von Dimensionierung)



Kurzschlussverhalten des Umrichters:

- 1) reduzierte Stromtragfähigkeit ggü. Synchronmaschine
- 2) Reaktionspause beim Übergang vom Vorzustand in den Fehlerzustand

Verträglichkeit mit angewendeten Schutzprinzipien?

Impedanzschutz

Überstromschutz

Unterspannungsschutz

2. Aspekte der Netzstabilität

Anforderungen an den Umrichter im Fehlerfall

Formulierung eines **Lastenheftes** aus Sicht der vorherrschenden Schutzphilosophie



Auswertung von Fehlerschrieben aus dem realen Bahnstromnetz (DB)



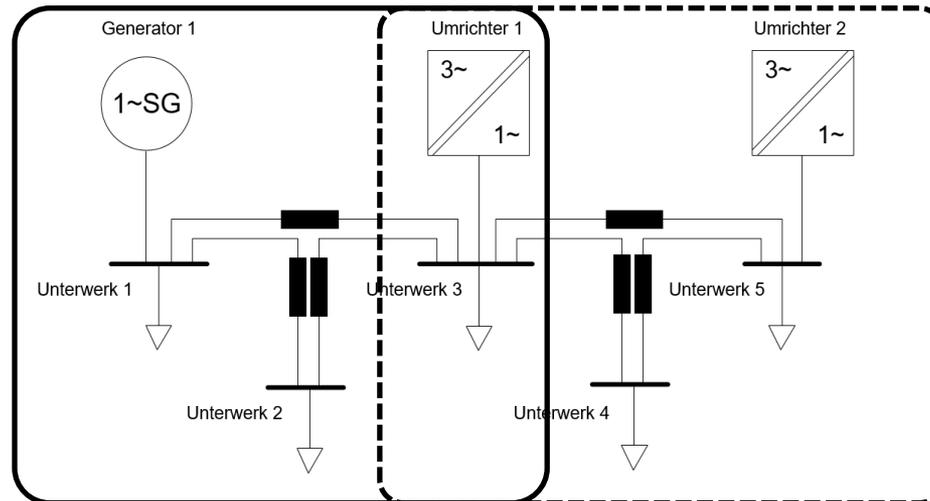
Umfangreiche Labortests mit Schutzgeräten (synthetisch generierte U-/I-Verläufe, Parametervariationen,...)

Erkenntnisse:

- Der Umrichter muss einen Kurzschluss unterbrechungsfrei speisen („Fault-Ride-Through“) → Pulsung darf aus Eigenschutzgründen nicht stoppen.
- Beim Übergang in den stationären Kurzschlusszustand muss die Regelung schnell und präzise reagieren, sodass keine unzulässigen Stromspitzen oder Oszillationen entstehen.
- Aus Sicht des Impedanzschutzes ist die fehlende Überlastfähigkeit der Halbleiterbauelemente vsl. beherrschbar solange Strom und Spannung im richtigen Verhältnis erzeugt werden → Anregung und Fehlerortung.
- Gegenüber Oberschwingungen und veränderter Grundfrequenz reagieren die Schutzgeräte mit verlängerten Anregezeiten.

2. Aspekte der Netzstabilität

Netzregelung unter veränderter Einspeisekonstellation



Verbundbetrieb:

- Umrichter muss sich an P(f)-Regelung (Primär- und Sekundärregelung) beteiligen (**netzstützende** Funktion)

Reiner Umrichterbetrieb:

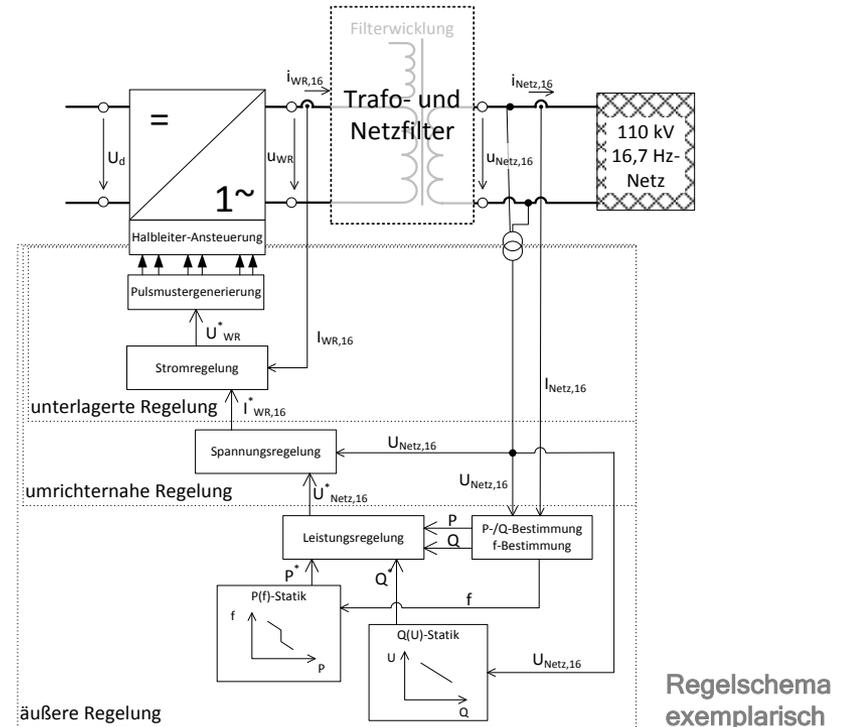
- mindestens 1 Umrichter muss f(P)-Verhalten aufweisen (**netzbildende** Funktion)
- Umrichter muss sich an P(f)-Regelung (Primär- und Sekundärregelung) beteiligen
- Parallelbetrieb mehrerer Umrichter muss möglich sein → „masseloses Netz“

2. Aspekte der Netzstabilität

Regelung des 16,7Hz-seitigen Teilstromrichters

Einflussgrößen auf das Klemmenverhalten:

- Verfahren zur Erkennung von Verbund- oder „Inselbetrieb“ (df/dt , Δf)
- Schnelligkeit und Genauigkeit der Frequenz- und Leistungsbestimmung (PLL, Verallgemeinerter Integrator, ...)
- Dynamik der Sollwertänderung (Q_{Soll}/dt , ...)
- Kennlinienparameter
- Übertragungsverhalten der einzelnen Regelungsebenen (P-, U-, I-Regler)
- Zeitkonstanten, Verstärkungen (z.B. virtuelle Trägheit)
- für Parallelbetrieb: „autark“ (ohne Kommunikation) oder „Master-Slave“



Die Hersteller verwenden bisher unterschiedliche Regelungen für Verbundbetrieb und reinen Umrichterbetrieb.

→ Wie damit umgehen?

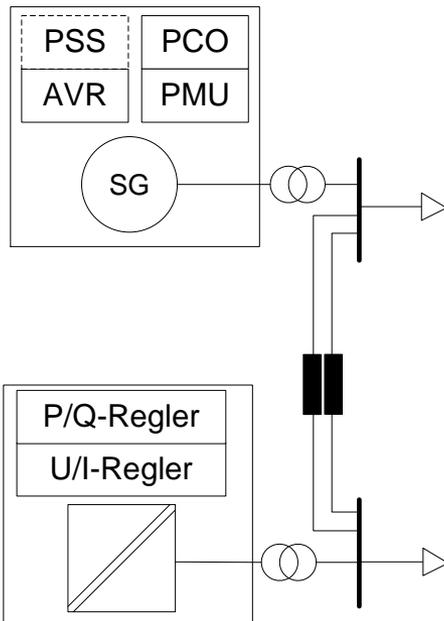


Inhalte

1. Erzeugerparkwechsel in der Bahnstromversorgung
2. Aspekte der Netzstabilität
- 3. Netzsimulation mit Umrichtern**
4. Fazit und Ausblick

3. Netzsimulation mit Umrichtern

Standardisierung dynamischer Betriebsmittelmodelle



PSS: Power Systems Stabilizer
 AVR: Automatic Voltage Regulator
 PCO: Primary Controller
 PMU: Prime Mover Unit

	Öffentliche Energieversorgung	Bahnstrom- versorgung
Kraftwerk:		
- Generator	IEEE 1110 [3]	kein Standard
- Antrieb/Regelung	PES-TR1 [2]	PES-TR1 [2]
- Erregung/Regelung	IEEE 421.5 [1]	IEEE 421.5 [1]
Umrichter:		
- Leistungsteil	im Zuge der	kein Standard
- Regelung(en)	Integration der	
	erneuerbaren	
	Energien erarbeitet	
Transformatoren		
Leitungen	CIGRE-Leitfaden [4]:	CIGRE-Leitfaden* [4]:
Schaltanlagen	Gruppe 1	Gruppe 1
Lasten	(f = 0,1 Hz ... 3 kHz)	(f = 0,1 Hz ... 3 kHz)

*tlw. mit Modellanpassungen



3. Netzsimulation mit Umrichtern

Modell Bahnstromumrichter - Vorbemerkungen

Ausgangslage:

- Regelungs-„Know How“ liegt beim Hersteller
- Anlagenvielfalt (Technologiestand, verschiedene Hersteller, Spezifikation der Betreiber)

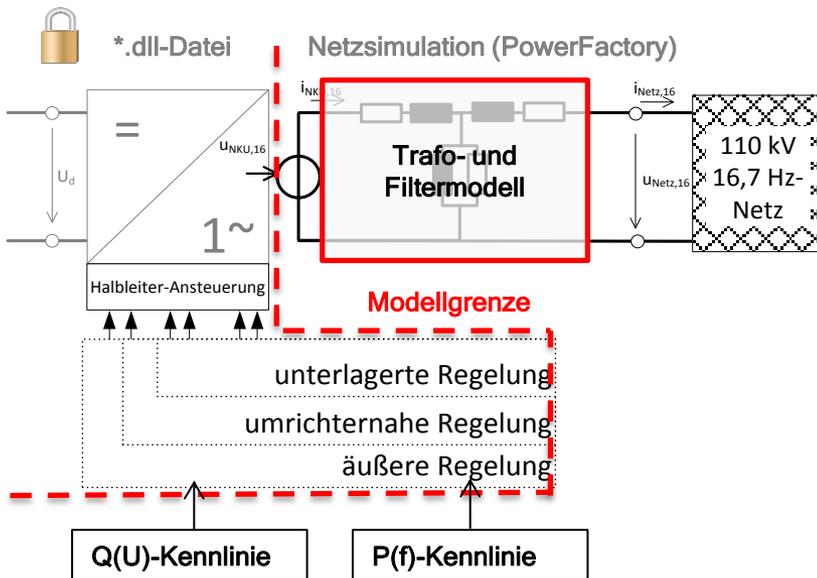
Ziel:

- möglichst realitätsnahes Umrichtermodell
- Simulation von Kurzschlüssen und Lastereignissen

Vorgehen:

- Entwicklung von externen Umrichtermodellen für Momentanwertsimulation (EMT) mit Regelungscode der Hersteller
- Einbindung in eine Simulation des Bahnstromnetzes über programmiertechnische Schnittstelle
- enge Zusammenarbeit mit Umrichterherstellern

3. Netzsimulation mit Umrichtern Modell Bahnstromumrichter – Details



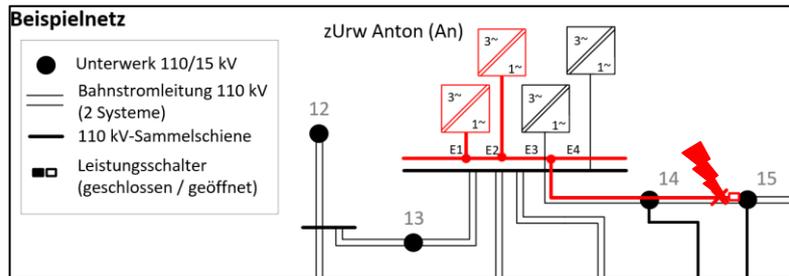
1) Auslagerung der Umrichterregelung in *.dll-Datei

- steuerbare Spannungsquelle als Platzhalter für Umrichter in der Netzsimulation
- kein Zugriff auf Regelungscode (Black-Box-Prinzip)
- Austausch von benötigten U-/I-Signalen zwischen *.dll-Datei und Netzsimulation

2) Eingabe von Kennlinien als Sollwertgeber für die äußere Regelung

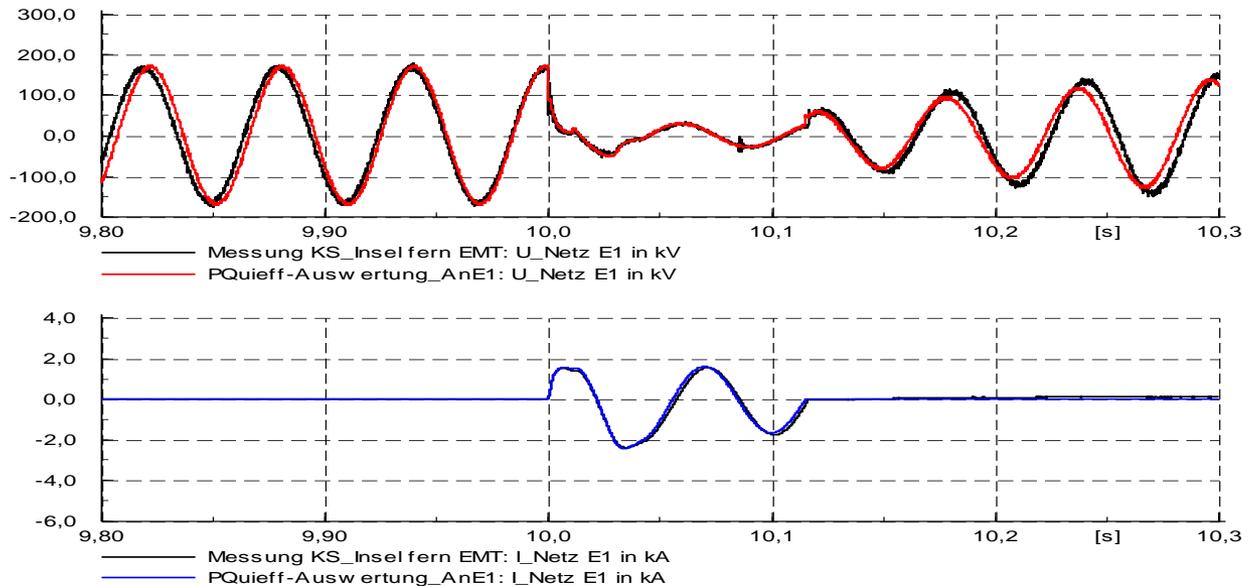
3) Zweckmäßiges Transformator- und Filtermodell mit Original-Parametern

3. Netzsimulation mit Umrichtern Modell Bahnstromumrichter – Validität



Szenario: anlagenferner Kurzschluss im Teilnetz:

- Umrichter An E1 und An E2 speisen den Fehler
- leerlaufende Leitung

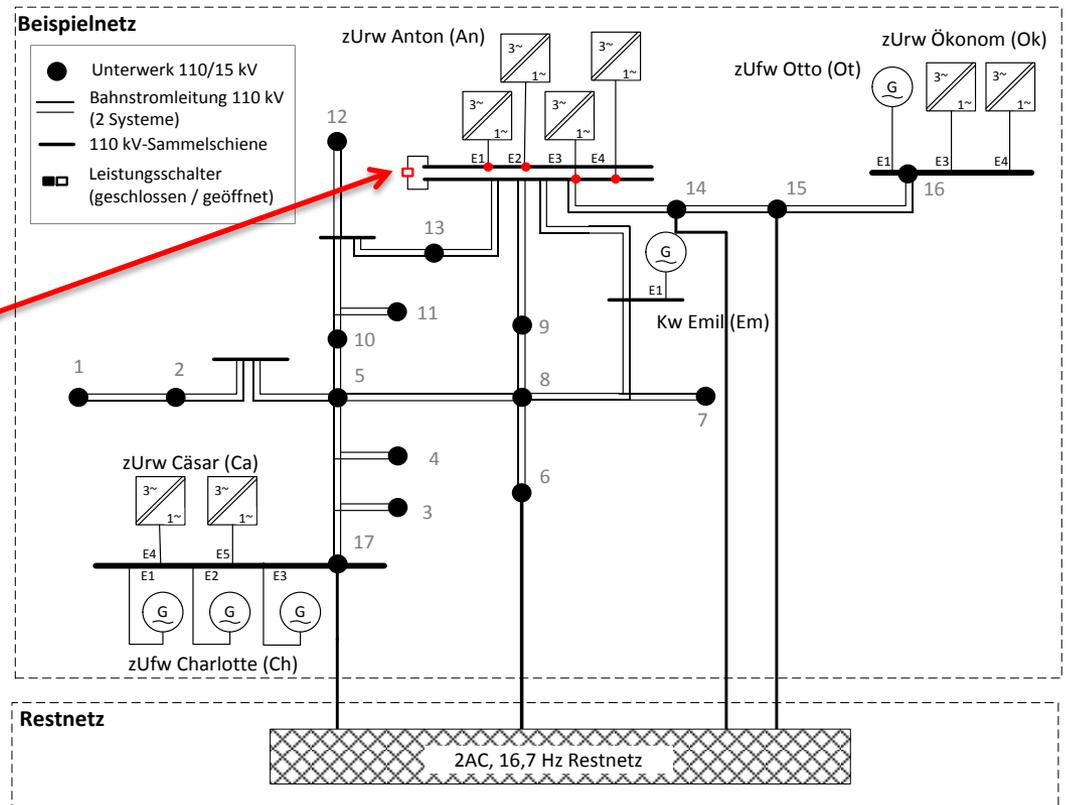


schwarz: Messung
rot: Simulation Spannung
blau: Simulation Strom

3. Netzsimulation mit Umrichtern Zusammenwirken aller Betriebsmittel

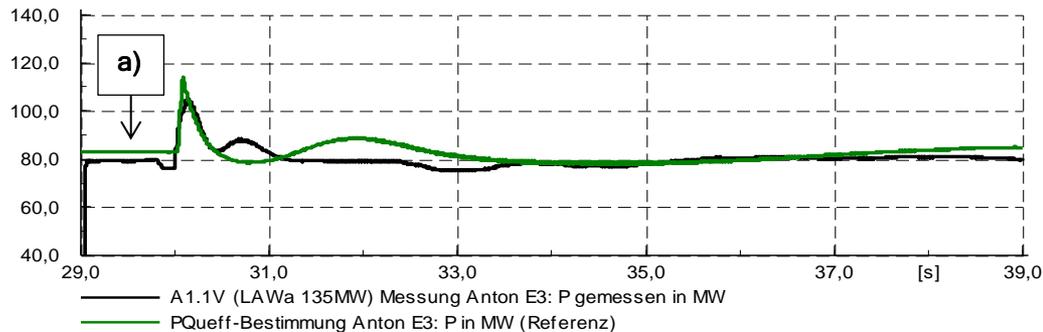
Szenario Lastsprung:

- zUrw Anton: zwei Umrichter je Sammelschiene speisen in das Beispielnetz ein
- durch Öffnen der Sammelschienenkupplung entfallen schlagartig 135 MW Einspeiseleistung
- übrige Erzeuger im Netz müssen Leistungsdefizit kompensieren



3. Netzsimulation mit Umrichtern Zusammenwirken aller Betriebsmittel

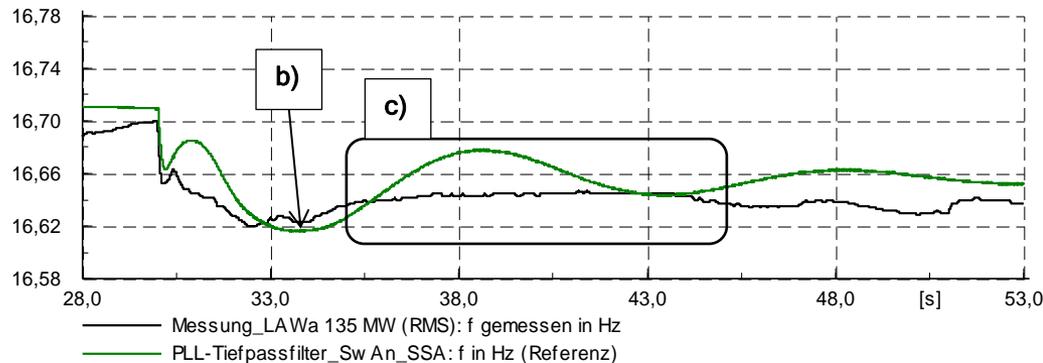
Wirkleistung Umrichter E3 (am Verbundnetz verbleibend):



Abweichungen beim Vergleich mit Messwerten vorhanden:

- a) Offset im Vorzustand → Rekonstruktion der Initialbedingungen
- b) Zeitpunkt Frequenzminimum → Anlaufzeitkonstante Restnetz
- c) Oszillationen während Primärregelung → Anlagenregler der rotierenden Erzeuger

Netzfrequenz Verbundnetz (Standort Anton):



schwarz: Messung
grün: Simulation



3. Netzsimulation mit Umrichtern Erfahrungen und Erreichtes

Betriebsmittelmodelle:

- entwickelter Ansatz von gekapselten **externen Modellen** der Bahnstromumrichter anhand von realen Messungen **validiert**
- rotierende Maschinenmodelle:
 - ein bekannter Ansatz für **Einphasengeneratoren** („äquivalente Dreiphasenmaschine“) wurde weiterentwickelt und **validiert**
 - Anlagenregler erfordern tlw. genauere Modellierung
 - Parameterbeschaffung für Regler- und Maschinenmodelle schwierig

Netzsimulation:

- plausibles **Zusammenwirken** aller Betriebsmittelmodelle erreicht, Stellschrauben bzgl. Ungenauigkeiten identifiziert
- **Leistungsfähigkeit** der gewählten Simulationsarchitektur ist ausreichend: Beispielnetzsimulation über 60 s dauert 40 h ($\Delta t_{EMT} = 2,5\mu s$)
→ Verbesserungspotential erkannt



Inhalte

1. Erzeugerparkwechsel in der Bahnstromversorgung
2. Aspekte der Netzstabilität
3. Netzsimulation mit Umrichtern
- 4. Fazit und Ausblick**



4. Fazit und Ausblick

Netzsimulation mit Umrichtern

1. Die erstellte Simulationsumgebung ermöglicht weitere Untersuchungen zum **Thema Netzregelung:**
 - Erzeugerverhalten während Momentanreserve und Primärregelung
 - Teil- und Verbundnetze sowie variable Anteile von Umrichterspeisung sind darstellbar
 - Überprüfung bestehender und neuer Regelungskonzepte für Umrichter in Hinsicht auf einen „masselosen“ Betrieb
2. Die erstellte Simulationsumgebung ermöglicht weitere Untersuchungen zum **Thema Schutz:**
 - Fehlerszenarien mit variablen Anteilen von Umrichterspeisung
 - Nachstellen von Kettenreaktion (Modelle der Schutzeinrichtungen berücksichtigen)



4. Fazit und Ausblick

Aspekte der Netzdynamik

1. Die **Begrifflichkeiten** für Netzzustände und Regelungsverfahren von Umrichtern sollten übergreifend konsolidiert werden. (**Inselnetz, netzstützende/netzbildende Umrichter**).
2. Für den „masselosen“ (Teil-)Netzbetrieb sollte der Bahnnetzbetreiber ein **Regelungsverfahren vorgeben**, dass:
 - autark arbeitet (keine breitbandige Kommunikation zwischen Erzeugerstandorten) und
 - netzbildend im Sinne der praktizierten Frequenz-Wirkleistungsregelung ist.
3. An einem **Lastenheft für das Verhalten von Bahnstromerzeugern bei Netzfehlern** aus Sicht der vorherrschenden Schutzphilosophie sollte weitergearbeitet werden.



»Wissen schafft Brücken.«

Dipl.-Ing. Christoph Pache
50Hertz Transmission GmbH
Netzprognosen und Engpassmanagement
Am Umspannwerk 10
15366 Neuenhagen bei Berlin
+49 30 5150 2744
christoph.pache@50hertz.com

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan
TU Dresden,
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik
Professur Elektrische Bahnen
Hettnerstr. 3, Gerhart-Potthoff-Bau, Raum 253
+49351 / 463-36730
www.e-vs.de



Referenzen

- [1] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. In: *IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992)* (2006)
- [2] Technical Report PES-TR1: Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies. In: POWER SYSTEM DYNAMIC PERFORMANCE COMMITTEE POURBEIK ; POWER SYSTEM STABILITY SUBCOMMITTEE ; TASK FORCE ON TURBINE-GOVERNOR MODELING (Hrsg.) (2013)
- [3] IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices in Stability Analyses. In: THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC (Hrsg.) (2002)
- [4] WORKING GROUP 02 (INTERNAL VOLTAGES), STUDY COMMITTEE 33: Guidelines for Representation of Network Elements When Calculating Transients, CIGRE (2000)