



**BTC NetWork Forum Energie**

**Netzsimulation in Forschung und Lehre**

**Aktuelle Erkenntnisse und Implikationen für den Netzbetrieb**

vorgetragen von Dr. Klaus Pfeiffer

(stellvertretend für die BTU-Arbeitsgruppe)

BTU Cottbus-Senftenberg

Berlin, 29.09.2015

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>Vorstellung</b>     | <b>Kurzvorstellung BTU Cottbus-Senftenberg</b>        |
| <b>Ausgangslage</b>    | <b>Erfordernis für einen Netzsimulator</b>            |
| <b>Rückblick</b>       | <b>Aufbau und Entwicklung eines ersten Simulators</b> |
| <b>Konzept</b>         | <b>Konzeptvorstellung des Netzsimulators</b>          |
| <b>Einsatz</b>         | <b>Einsatz des Netzsimulators</b>                     |
| <b>Zusammenfassung</b> |   |

**Kurzvorstellung  
BTU Cottbus-Senftenberg**

## GRÜNDUNG: 1. Juli 2013

**9.000** Studierende, davon **1.740** internationale Studierende aus über 100 verschiedenen Nationen

ca. **200** Professuren und Juniorprofessuren

## 8 Fakultäten

- Naturwissenschaften, Mathematik und Informatik
- Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung
- Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen
- Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik
- Ingenieurwissenschaften und Informatik
- Naturwissenschaften
- Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Musikpädagogik
- Bauen





**Zentralcampus Cottbus**



**Campus Senftenberg**



**Campus Cottbus-Sachsendorf**

## GRÜNDUNG: 1994

- Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. Harald Schwarz
- Mitarbeiter: 8
- Drittmittelmitarbeiter: ca. 20
- Studenten je Jahrgang: ca. 70 – 100

## Lehrbetrieb in folgenden Studiengängen

- B.Sc. / M.Sc. Elektrotechnik
  - Elektrische Energietechnik
  - Automatisierungstechnik und Antriebssysteme
  - Energiesysteme und dezentrale Energieversorgung
- M.Sc. Power Engineering
  - Electrical Power Engineering
  - Sustainable Energy Supply
  - Power Plant Technology
- M.Sc. Maschinenbau und M.Sc. Wirtschaftsingenieurwesen



- **Energieverteilung**
  - Netzberechnung und Konzeptstudien
  - Netzmessungen
  - MicroGrid mit Elektroautos
  - **Netzsimulator**
- **Hochspannungstechnik**
  - Versuchsfelder für Mittel- und Hochspannung
  - Klimakammer für Hochspannung
- **Elektromagnetische Verträglichkeit**
  - Absorberkammer
  - Modenverwirbelungskammer mit beweglichen Wänden

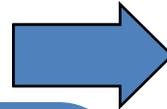


**Erfordernis  
für einen Netzsimulator**

## Veränderte Anforderungen ....

### .... an den Betrieb der elektrischen Energieversorgungssysteme

- stochastische, nicht bedarfsgerechte EE-Einspeisung
- ~90% der EE-Anlagen sind in HS-Ebene und darunter installiert
- Verdrängung regelbarer Kraftwerkseinspeisung
- zukünftige Bereitstellung von SDL
- Netzebenen-übergreifende Auswirkungen



### .... an die universitäre Lehre

- Herkömmliche Aufgaben der universitären Ausbildung bleiben:  
Vermittlung von grundlegenden Kenntnissen im Bereich der „klassischen“ Energietechnik
- zukünftiger Betrieb der Netze muss stärker in den Mittelpunkt der Lehre gestellt werden

## Möglichkeit der Umsetzung

Entwicklung und Anwendung eines betriebsrealistischen Simulationswerkzeuges

## **Aufbau und Entwicklung eines ersten Simulators**



# **Konzeptvorstellung des Netzsimulators**

## Zeitschiene

Lastenheftphase 04/2013 bis 12/2013

Ausschreibungsphase 01/2014 bis 05/2014

Beginn Umsetzung 06/2014

## Realisierung

### BTC AG

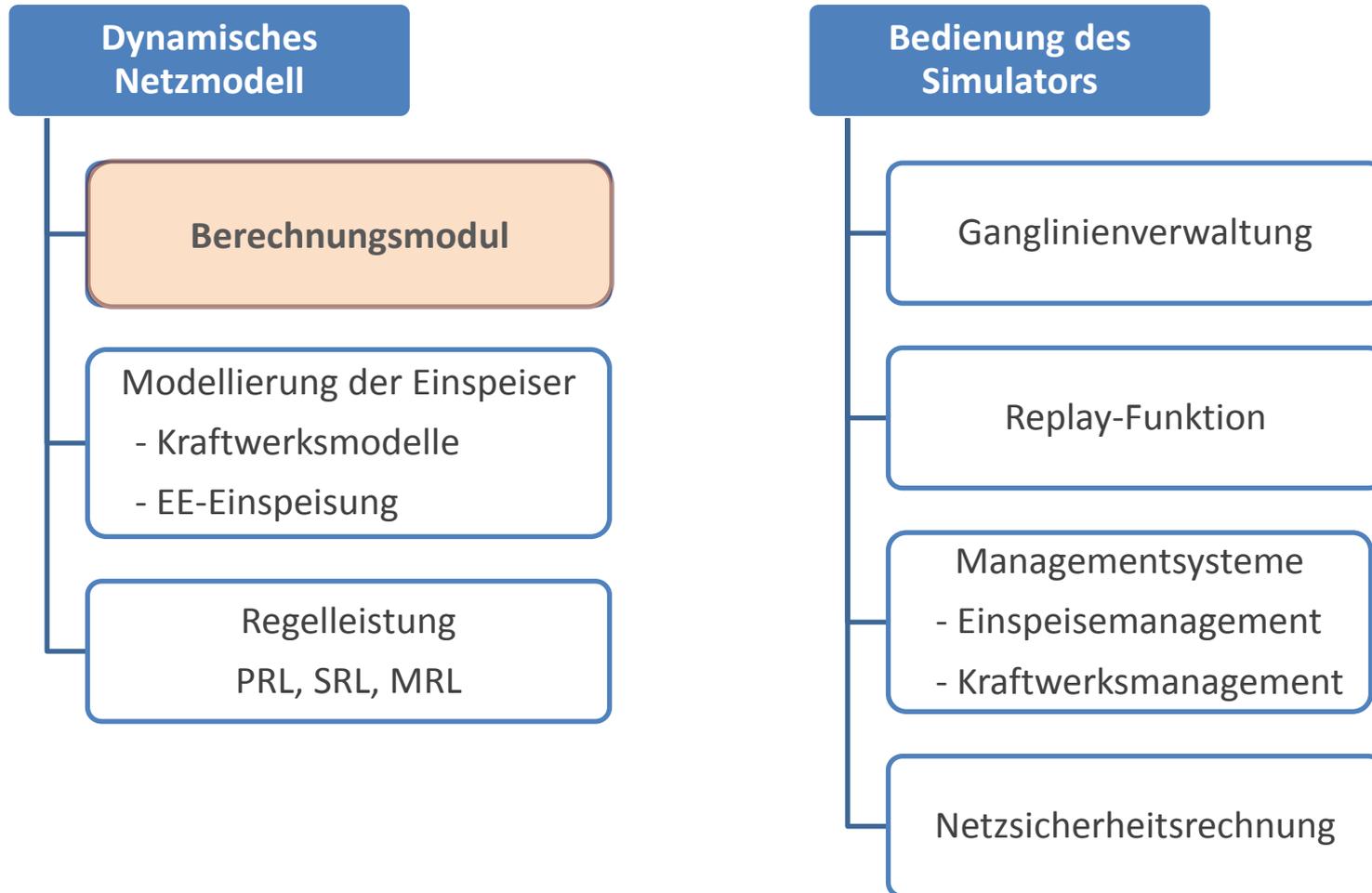
Projektkoordination  
Leitsystemmodellierung  
Managementsysteme



### DigSILENT GmbH

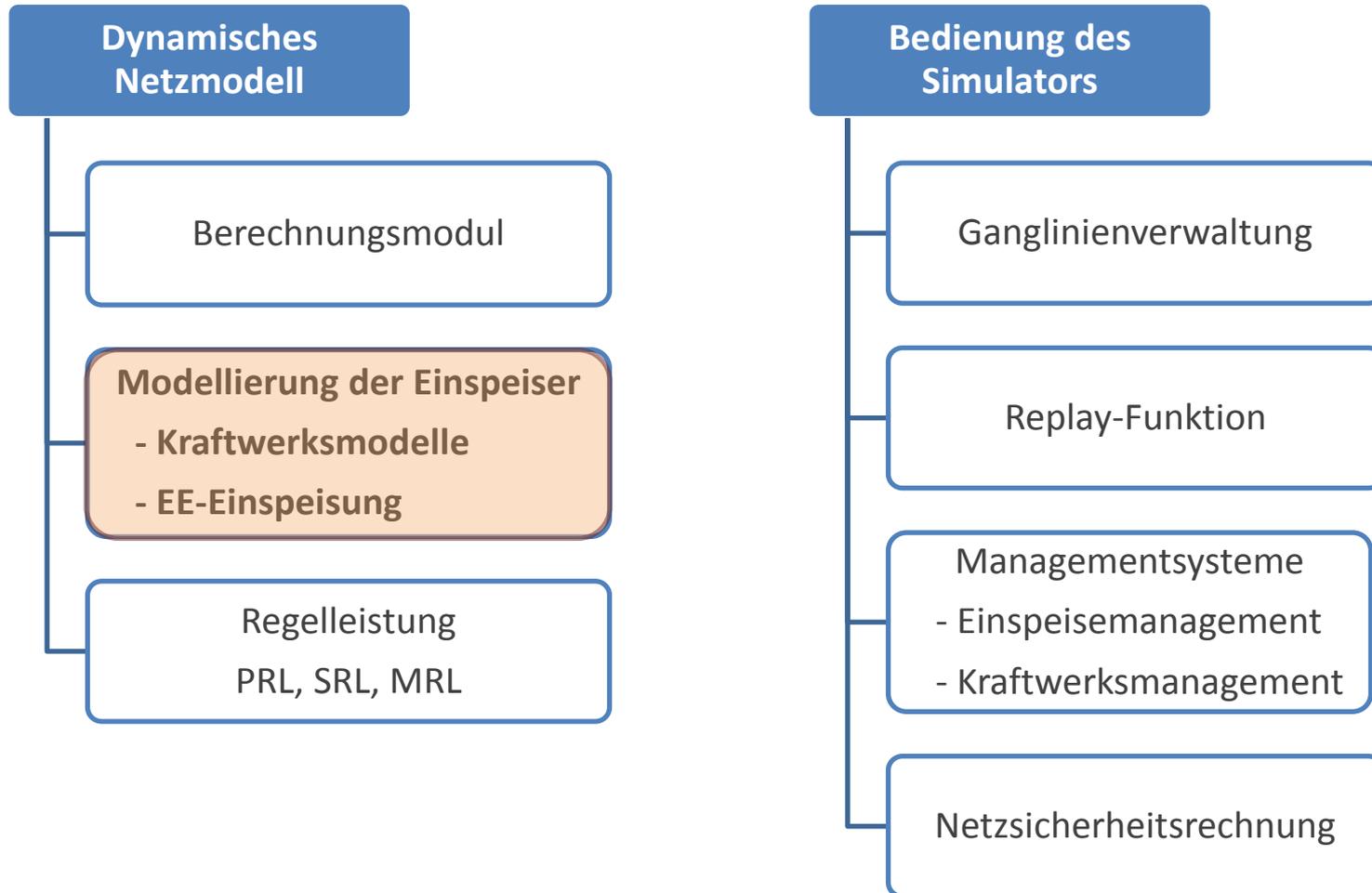
Simulations-Engine  
(auf Basis Netzberechnungssoftware PowerFactory)  
Entwicklung Einspeisermodelle





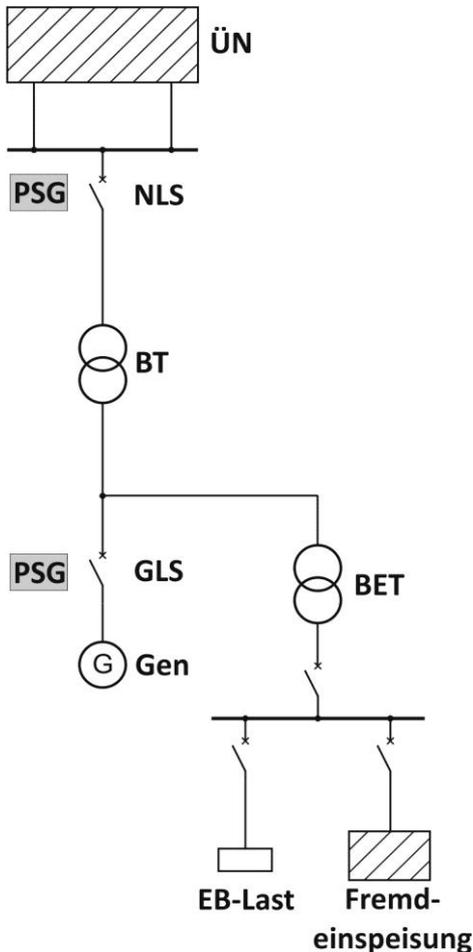
## Berechnungsmodul

- **Lastflussberechnung (Prozesssimulation)**
  - Beschreibung sämtlicher Systemzustände auf Basis von Differenzialgleichungen
  - Keine(n) Slack-Knoten, da sich die Leistungsflüsse auf Basis der Netzimpedanzen, der Generator – EMF's, der eingespeisten Ströme aus PV- und Wind-Generatoren und der Lastcharakteristiken durch die Kirchhoff'schen Regeln ergeben
  - Berücksichtigung der Randnetze über „Extended Ward Equivalents“ mit grundlegenden Kenngrößen wie PRL und SRL, Spannungsregelung, Anlaufzeit und Kurzschlussleistung
- **Kurzschlussstromberechnung (HEO)**
  - Kurzschlussstromberechnung basiert auf Snapshot der Simulations-Engine zu einem bestimmten Zeitpunkt
  - Berechnung der Kurzschlussströme erfolgt entweder nach Normen (IEC / DIN) oder nach der „vollständigen Berechnungsmethode“ (Ermittelt die Betriebsströme unter Berücksichtigung der Vorbelastungen)



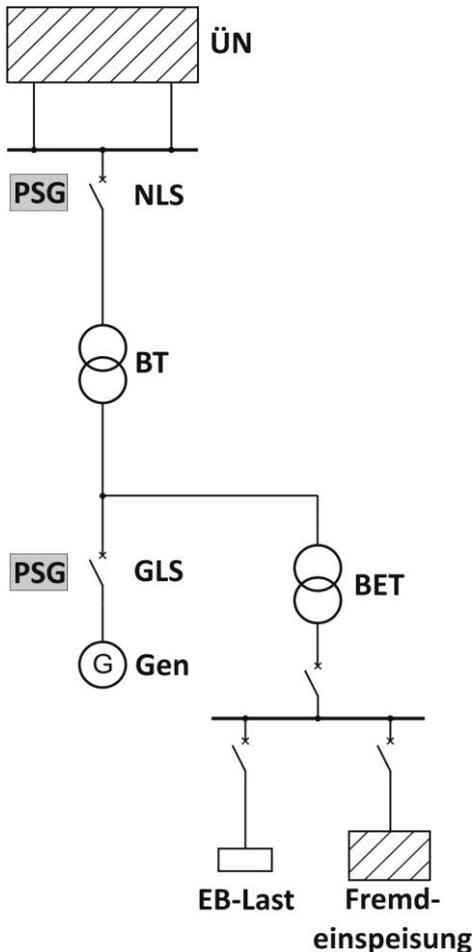


## Funktionen der Kraftwerksmodelle



- **Kraftwerksmodell**
  - umfasst Nachbildung des Kraftwerkseigenbedarfs mit
    - Blockeigentransformator (BET)
    - aggregierter Eigenbedarfslast
    - Fremd(netz)einspeisung
- **Generator (Gen)**
  - Ermittlung der Generatordrehzahlen mittels Bewegungsgleichung unter Berücksichtigung der Trägheitsmomente
  - Q-U-Regelung unter Einbeziehung der Stufenstellung des Blocktransformators (BT)
  - AVR-Modi:
    - Spannungsvorgabe  $\Rightarrow$  Spannungsregelung
    - Blindleistungsvorgabe  $\Rightarrow$  Blindleistungsregelung
    - cos phi Vorgabe  $\Rightarrow$  cos phi Regelung
  - P-Regel-Modi
    - Leistungs-Frequenzregelung
    - Drehzahlregelung

## Funktionen der Kraftwerksmodelle



- **Grundfunktionen des Generator- und Turbinenschutzes**
  - Über-/ Unterspannung
  - Über-/ Unterfrequenz
  - Überlastschutz
  - Rückleistungsschutz
  - Begrenzung Über- / Untererregung
- **Simulation der Synchronisationsvorgänge**
  - Parallelschaltgeräte (PSG) = Synchro-Check-Geräte mit Überwachung von
    - Frequenz
    - Spannungsbetrag
    - Winkel
  - Aufschaltung der PSG auf Generator-Drehzahlregelung

## Kraftwerksbedienbild (Entwurfsstand)

### Braunkohlekraftwerk C3 Block 1

Merit-Order-Liste Rankingplatz

Restzeit bis Erreichen angeforderter Zustand

Restverweildauer in synchronisierbarem Zustand

50.00 Hz

**Blockzustand**

Anfahren in Heiß  Anfahren in Heiß ● Zuschaltbereit ●

Abfahren in Insel  Abfahren in Insel ● Netzbetrieb ●

Abfahren in Warm  Abfahren in Warm ● Inselbetrieb ●

Abfahren in Kalt  Abfahren in Kalt ● Abfahren Aus ●

**Regelleistung**

Primärregelleistung   MW

Sekundärregelleistung   MW

**Regelband**

MW bis  MW

MW bis  MW

**Regelungsart** AVR Modus

|                        |                                     |
|------------------------|-------------------------------------|
| Spannungsregelung      | <input checked="" type="checkbox"/> |
| cos phi Regelung       | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Blindleistungsregelung | <input checked="" type="checkbox"/> |

Regelmodus (P/f oder n) P-f Regelung

**Regelfunktionen**

| Generatorspannung | Soll-Wert                      | Ist-Wert                       | Fahrplanwert                   |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Generatorspannung | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> |                                |
| Spannung am Netz  | <input type="text" value="0"/> | 405                            |                                |
| Wirkleistung      | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> |
| Blindleistung     | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> |                                |
| cos phi           | <input type="text" value="0"/> |                                |                                |
| Übererregt        | <input type="text" value="0"/> |                                |                                |
| Drehzahl          | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> |                                |

**Schutzfunktionen** Schutzstufe schnell

|                              |                          |
|------------------------------|--------------------------|
| Über-/Unterspannung          | <input type="checkbox"/> |
| Über-/Unterfrequenz          | <input type="checkbox"/> |
| Überlastschutz               | <input type="checkbox"/> |
| Rückleistungsschutz          | <input type="checkbox"/> |
| Begrenzung Über-/Unterregung | <input type="checkbox"/> |
| Schutz Notstromaggregat      | <input type="checkbox"/> |

**Kesselinformationen**

| Kessel   | Zustand    | bezogene Kesseltemp.           |
|----------|------------|--------------------------------|
| Kessel 1 | hochfahren | <input type="text" value="0"/> |
| Kessel 2 | kalt       | <input type="text" value="0"/> |

Anforderung Kessel 2

**Parallelschaltgerät**

|                           |                                |
|---------------------------|--------------------------------|
| Start Parallelschaltgerät | <input type="checkbox"/>       |
| delta U                   | <input type="text" value="0"/> |
| delta f                   | <input type="text" value="0"/> |
| delta phi                 | <input type="text" value="0"/> |

Netzschtaltung

Start Notstromaggregat

Start Turbine (Manuell/Automatisch)

Start Turbine

Turbine bereit

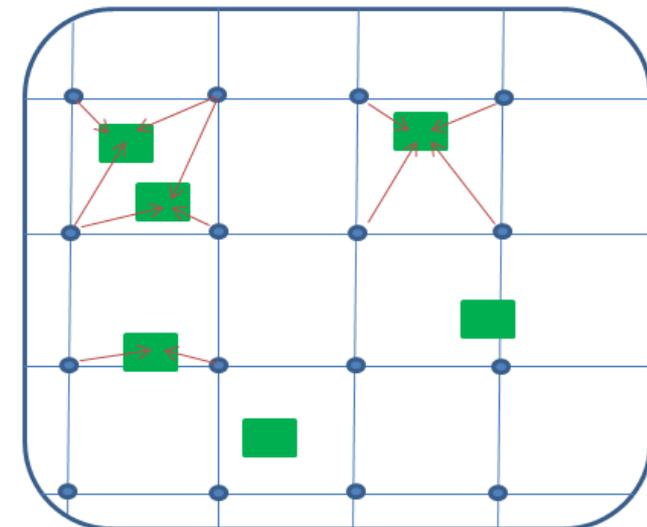
Turbine gestartet

|                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| P                              | -506                              |
| Q                              | 12                                |
| Frequenz                       | 50.00                             |
| Sollwirkleistung               | <input type="text" value="0"/>    |
| Istwirkleistung                | <input type="text" value="0"/>    |
| Istwirkleistung netto          | <input type="text" value="0"/>    |
| Sollspannung                   | 19.00                             |
| Nennspannung                   | <input type="text" value="0.00"/> |
| Blindleistung                  | <input type="text" value="0"/>    |
| primäre Nennregelleistung      | <input type="text" value="0"/>    |
| primäre aktive Regelleistung   | <input type="text" value="0"/>    |
| sekundäre Nennregelleistung    | <input type="text" value="0"/>    |
| sekundäre aktive Regelleistung | <input type="text" value="0"/>    |
| maximale Wirkleistung          | <input type="text" value="0"/>    |
| minimale Wirkleistung          | <input type="text" value="0"/>    |

## EE-Einspeiser

- **Wirkleistungseinspeisung** auf Basis meteorologischer Daten
  - erfordert zeitreihenbasierte Wetterdaten für  
Windgeschwindigkeit  
Globalstrahlung  
für die Gitterpunkte eines das Netzgebiet  
überspannenden Maschennetzes
  - Erstellung von parkbezogenen Ganglinien für  
Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung
  - Rechenkern ermittelt entsprechend dem WEA oder PV-  
Modell die Einspeiseleistung
- **Blindleistungseinspeisung**
  - Regelmöglichkeiten entsprechend VDE AR 4120  
Q(U)-Kennlinie  
Q(P)-Abhängigkeit  
direkte Q-Vorgabe  
Vorgabe  $\cos \phi$

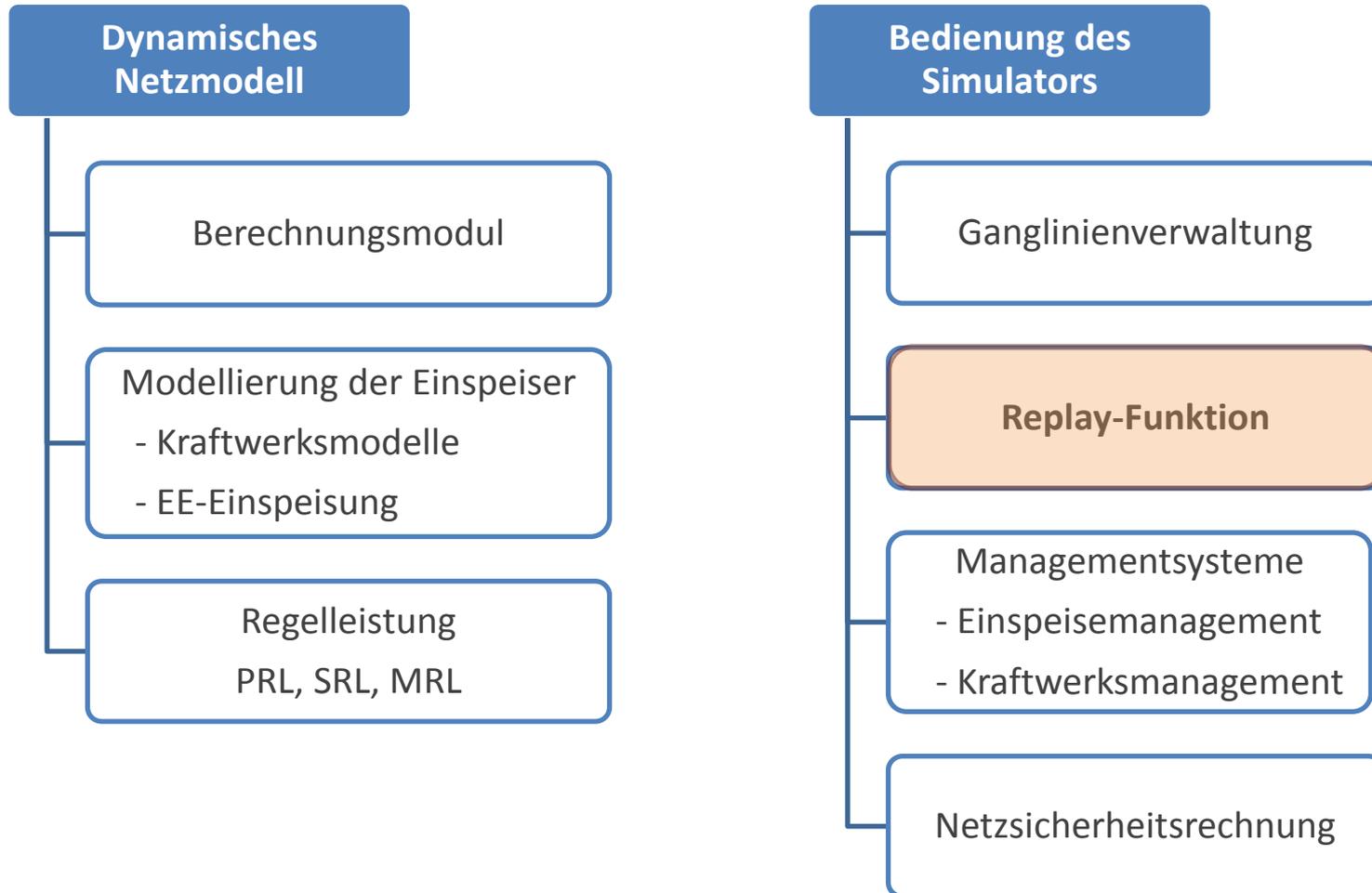
Quelle: BTC AG



● Gitterpunkt mit Meteodaten

■ Anlagenpark

●  
↘ Für die Anlage zu  
berücksichtigender  
Gitterpunkt



## Record & Replay-Funktion

- **Record** = Speicherung der Bedienaktionen und Bildschirminhalte der Trainer und Schüler
  - **Speichervolumen:**  
bis zu 20 Replays mit bis zu 6 Stunden Dauer
  - **Speicherumfang:**  
protokollierte Ereignisse sowie die als Screenshot gesicherten Bildschirminhalte
  - **Safepoints** (entsprechen Wiederherstellungspunkten):  
zyklisch alle 5 min. zum Wiederaufsetzen der Simulation an diesen Punkten
  - rekonstruiertes Prozessabbild kann als Ausgangsmodell für eine zukünftige Trainingssitzung dienen
- **Replay** = Abspielen der zuvor gespeicherten Bedienaktionen und Bildschirminhalte zur Auswertung von Trainingssitzungen

## Replay-Modul Traineransicht (Entwurfsstand)

Lehreransicht - Mockup

Bildschirm 1 Bildschirm 2 **Bildschirm 3** Bildschirm 4 Bildschirm 5 Bildschirm 6

**Steuerung**

Steuerung Nachführen Anweisen Sollwertgabe

E UW Sadenbeck 110kV  
Tr 101 LS -

ein  aus

Steuern  
Abbrechen

Tracing in Richtung Netz

DR1  
DR2  
DR3  
DR4  
DR5  
DR6  
DR7  
DR8

115,5 U E01 E03  
81 I  
101  
Sbe  
Kem  
1

115,3 U E03  
95 I E01  
101  
FhaN

115,6 U E04  
9 I E02  
102

112 I E03  
116,0 U E02  
24 I E04  
102

29 I E06  
69 I E01  
101

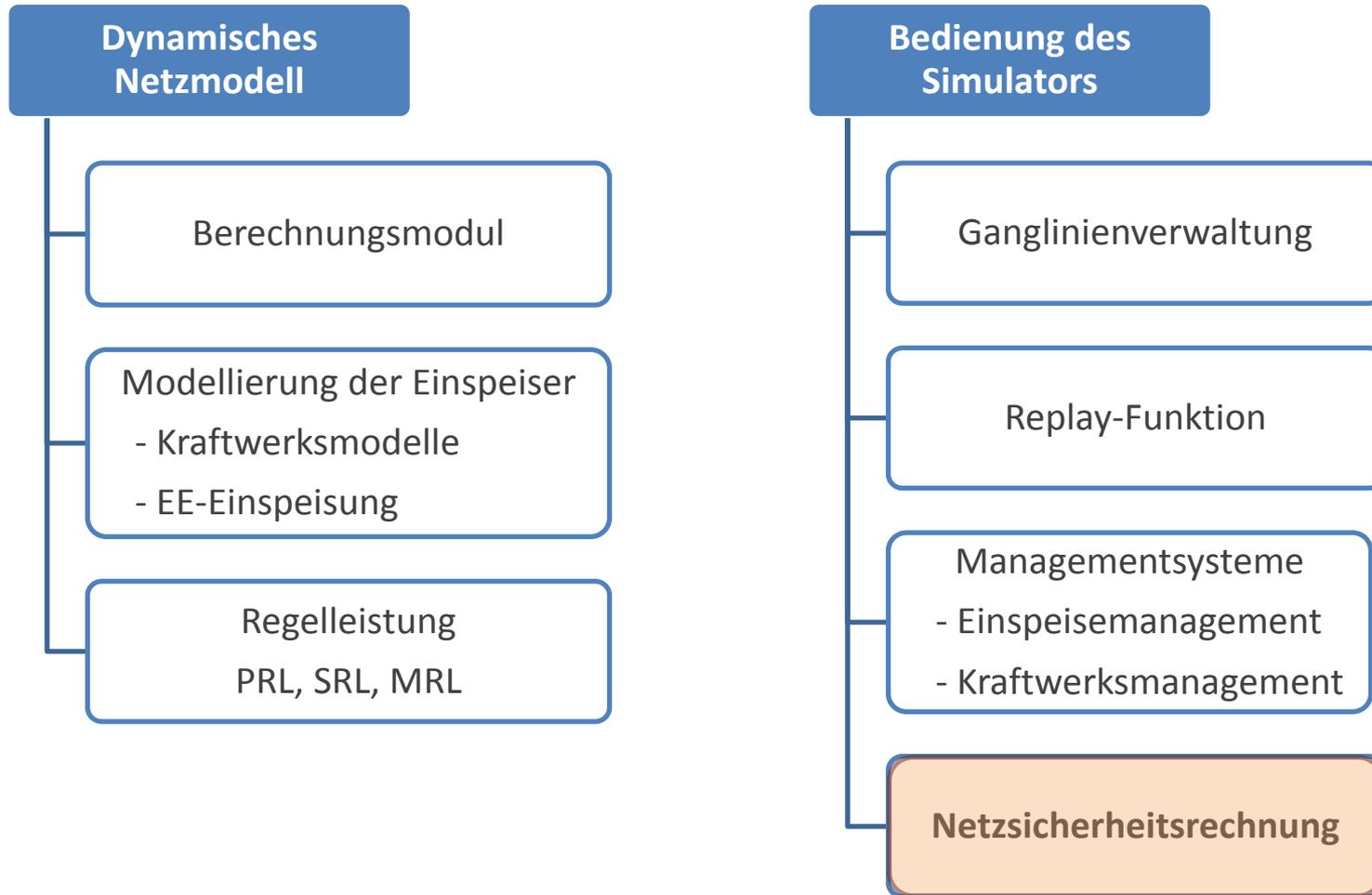
25 I E05  
116,0 U  
103

BEF W HSW E UW Sadenbeck 110kV Tr 101 LS AUSGABE aus DR1

10:02:33

Quelle: BTC AG

<<<< << || |> >> >>>>



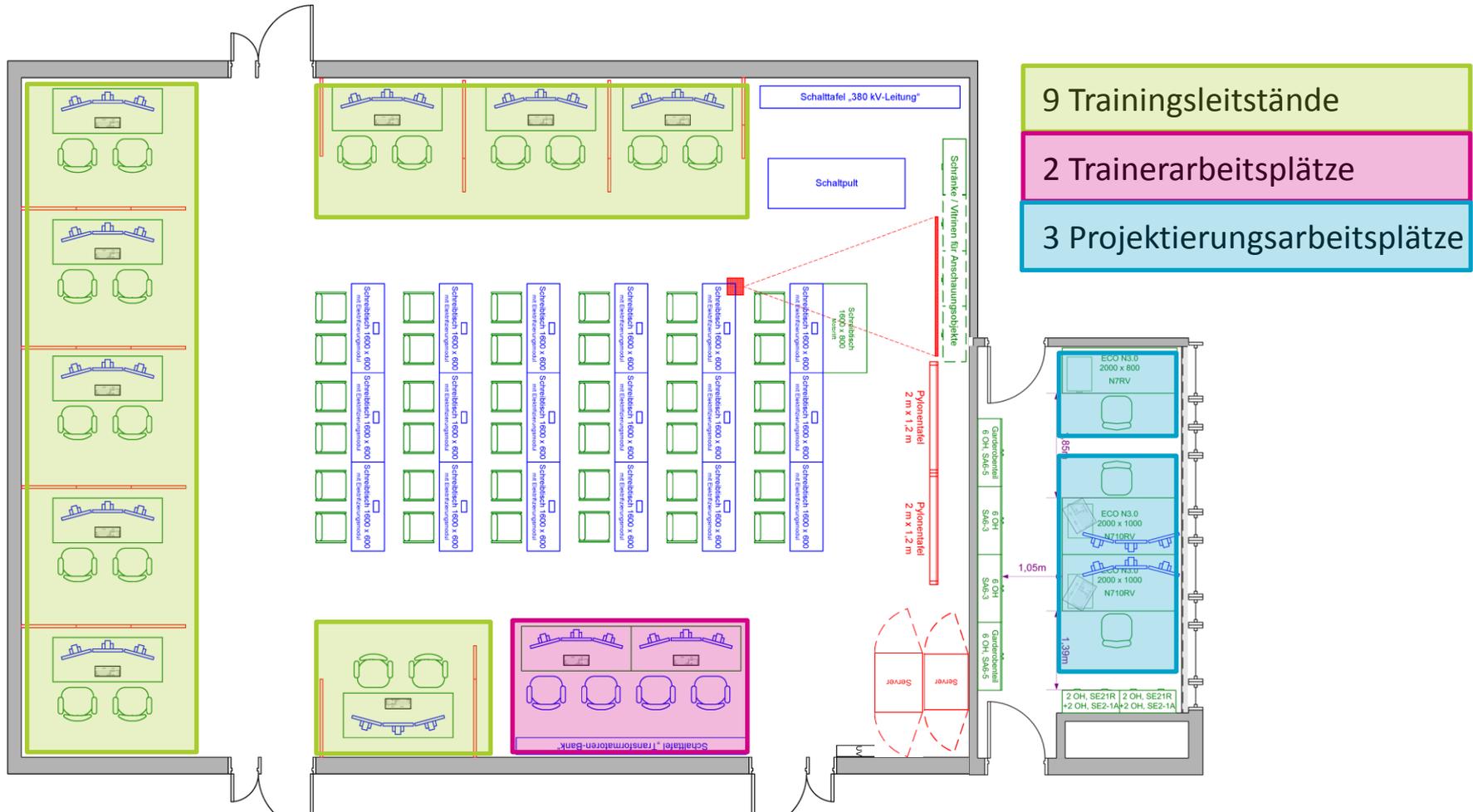
## Netzsicherheitsrechnung (n-1)-Berechnung

- basiert auf einem Snapshot der Simulations-Engine zu einem bestimmten Zeitpunkt
- beruht auf einer klassischen Lastflussberechnung
- **Ausführung:**
  - a) zyklisch Ausführung
  - b) auf Anforderung des Bedieners
- **Varianten:**
  - a) statische (n-1)-Ausfallsimulation
    - ⇒ fest vorgegebene (n-1)-Ausfallliste von Betriebsmitteln
  - b) dynamische (n-1) Ausfallsimulation
    - ⇒ Ranking auf Basis der aktuellen Betriebsmittelauslastungen
- Ergebnislisten bzw. Darstellungen frei konfigurierbar

## Netztrainingsraum im Zentrum für Energietechnologie der BTU-CS



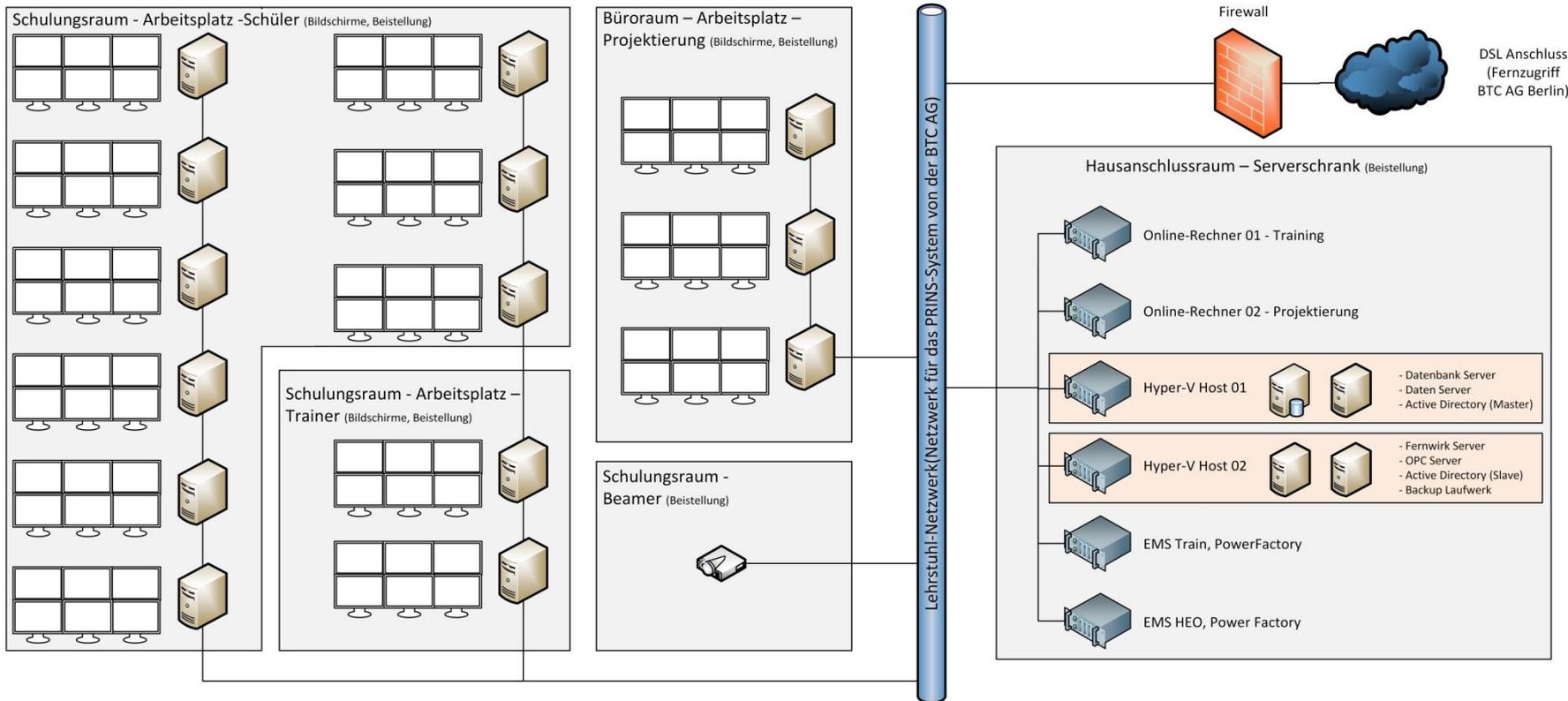
## Grundriss Netztrainingsraum



- 9 Trainingsleitstände
- 2 Trainerarbeitsplätze
- 3 Projektierungsarbeitsplätze

# Konfiguration in Überblick

Vorstellung | Ausgangslage | Rückblick | **Konzept** | Einsatz | Zusammenfassung



## **Einsatz des Netzsimulators**

- **Aufbau eines Lehrmoduls** in deutsch- und englischsprachigen Masterstudiengängen
  - Netzbetriebsführung
  - Power System Operation
  
- **Lehrinhalte** (ausgewählte Schwerpunkte)
  - Grundlagen des Elektroenergiesystems
    - Einspeisungen (konventionelle Kraftwerke, EEG-Einspeiser)
    - Lasten
    - Netze (Betriebsmittel, Parameter, Topologie, Umspannwerke)
  - Netzbetrieb - Schalthandlungen (Schaltprogramme, -gespräche)
  - Operative Systemführung
    - Systemverantwortung und -sicherheit
    - Systemzuständigkeiten und –verantwortlichkeiten
    - Systemdienstleistungen
    - Normalbetrieb und gestörter Betrieb
  - Zusammenspiel von konventioneller Erzeugung und EE-Erzeugung
- ⇒ Praktika unter realitätsnahen Bedingungen

## Zusammenfassung

- Aufbau eines neuartigen Netzsimulators an der BTU Cottbus-Senftenberg zusammen mit den Unternehmen BTC und DigSILENT
- Komplexes, anspruchsvolles System mit einer betriebsrealistischen Simulation
- Einsatz des Netzsimulators in Lehrveranstaltungen  $\Rightarrow$  Aufbau eines neuen Lehrmoduls
- Bessere Heranführung von zukünftigen Absolventen an die Themen der Netzbetriebsführung
- Ausbildung unter realitätsnahen Bedingungen
  - Wechselwirkungen zwischen den Vorgängen in den verschiedenen Netzebenen
  - Komplexe Zusammenhänge zwischen Erzeugung - Übertragung – Verbrauch
- Einsatz für vielfältige Untersuchungsaufgaben, bspw.
  - Zukunftsszenarien hinsichtlich Entwicklung Kraftwerkspark und EE-Erzeugung
  - zukünftige Erbringung von Systemdienstleistungen

**Dank an die Kollegen von BTC und DigSILENT  
für die konstruktive Zusammenarbeit in diesem Projekt!**



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.**

**Das BTU-Projektteam (v.r.n.l.)**

Dipl.-Ing. B. Buckow

Dipl.-Ing. D. Lehmann

Dipl.-Ing. N. Brose

Dr.-Ing. K. Pfeiffer

**Kontakt**

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg

Institut für Energietechnik

Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik

Zentralcampus, Lehrgebäude 3E

Telefon: 0355 / 69-4502