

# Evaluation von Smart-Grid- Betriebsführungskonzepten mit CERBERUS

CERBERUS-Anwendertreffen 2013

Sebastian Rohjans  
OFFIS – Bereich Energie

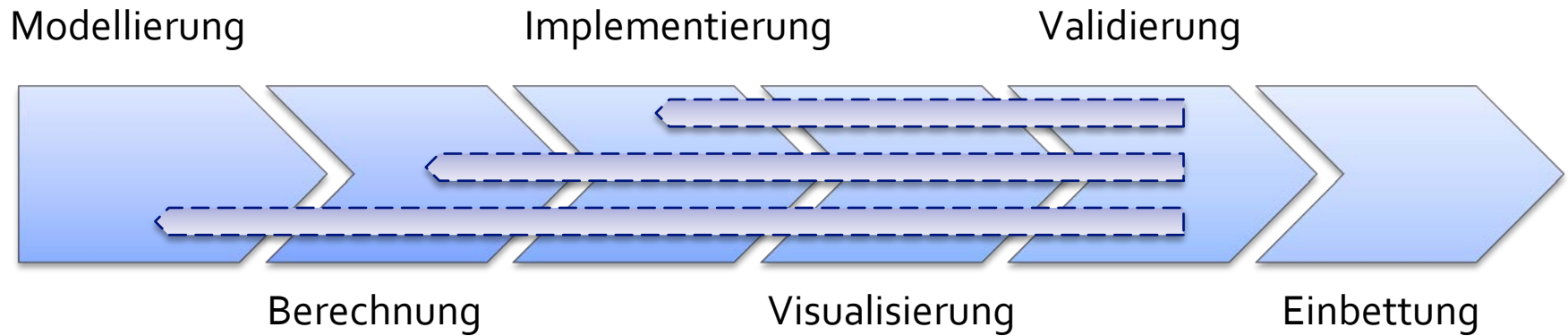
2013-11-06

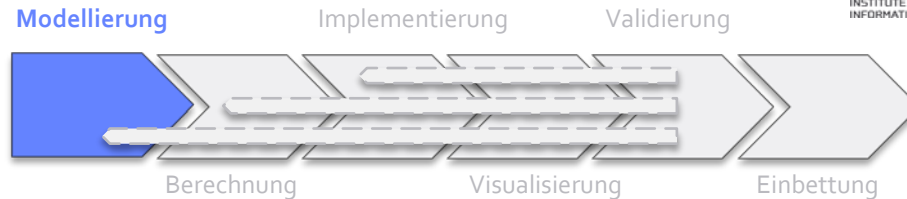


# SIMULATION ALLGEMEIN

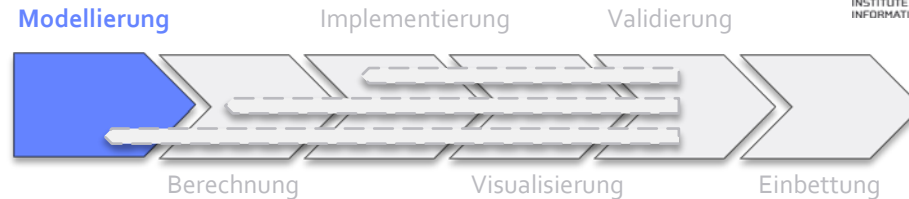
- ▶ Allgemein wird unter dem Begriff Simulation die Berechnung oder Durchführung von virtuellen Experimenten verstanden
  - ▶ Vorabberechnung eines Systems (z.B. Wettervorhersage)
  - ▶ Nachstellung von bestimmten Szenarien zur Analyse (z.B. zukünftiges Energienetz)
  
- ▶ Wann wird Simulation eingesetzt?
  - ▶ Wenn reale Experimente aus zeitlichen, räumlichen oder Kostengründen nicht sinnvoll oder nicht durchführbar sind
  - ▶ Zur Ergänzung von theoretischen Analysen und Experimenten (ersetzt diese aber nicht komplett)
  - ▶ Zum Sammeln von Erkenntnissen zu einem Vorfall oder Optimierung von bekannten Szenarien
  
- ▶ Vorteile
  - ▶ Lange Zeiträume in kurzer Zeit simulieren [Bao5]
  - ▶ Tests sind einfach wiederhol- und automatisierbar [Too6]

# Simulationpipeline [nach Buog]

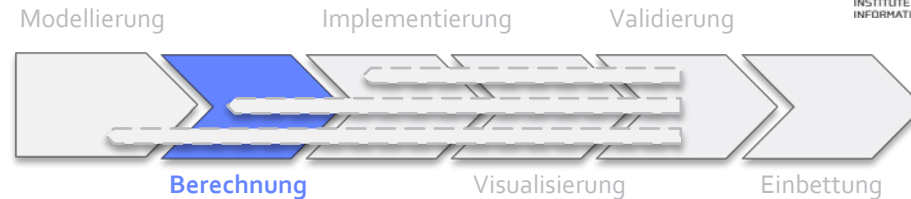




- ▶ Entwicklung von Modellen als vereinfachtes Abbild der betrachteten Realität
  - ▶ Formale Beschreibung dient als Basis für die anschließende Berechnung
  - ▶ Sind an das Einsatzgebiet angepasst und erfüllen einen bestimmten Zweck
- ▶ Allgemeiner Ablauf:
  1. Festlegen Modellgrenzen: Was soll genau simuliert und analysiert werden? Wofür wird das Modell entwickelt?
  2. Festlegen Beziehungen: In welchen Beziehungen stehen die eingesetzten Parameter zueinander?
  3. Festlegen Modellzweck: Welche konkrete Aufgabe soll das Modell erfüllen? Welches gewünschte Ziel hat der Einsatz der Simulation?

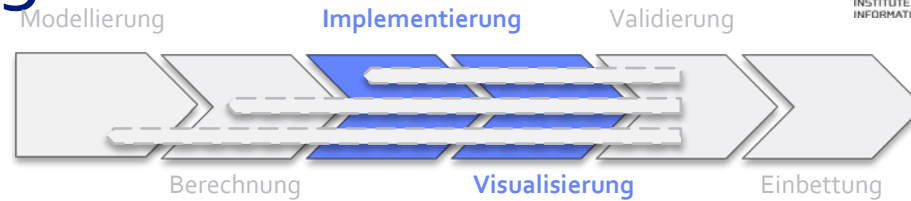


- ▶ Abwägung zwischen Aufwand und Genauigkeit des Modells ist wichtig
  - ▶ Je detaillierter ein Modell ist, umso genauer sind die berechneten Resultate
  - ▶ Aber mit steigendem Detailgrad der Modelle steigen auch die anfallenden Simulationskosten
- ▶ Die eine perfekte Beschreibung gibt es in den meisten Fällen nicht  
→ Entwicklung von möglichst passenden Modellen



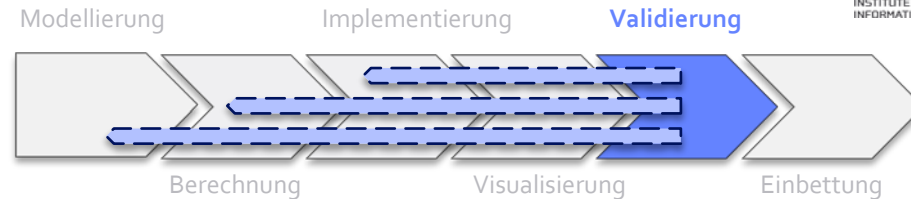
- ▶ Kontinuierliche Modelle müssen vor der Berechnung diskretisiert werden
- ▶ Berechnung der Lösung über möglichst effiziente Algorithmen
  - ▶ Analytische Lösung bei sehr einfachen Modellen
  - ▶ Heuristische Lösungsansätze sind bei kombinatorischen oder diskreten Problemen weit verbreitet
  - ▶ Direkt-numerische Ansätze liefern bei linearen Problemen weitestgehend exakte Lösungen
  - ▶ Approximativ-numerische Ansätze basieren auf Näherungsverfahren zur Approximation der Lösung

# Implementierung und Visualisierung

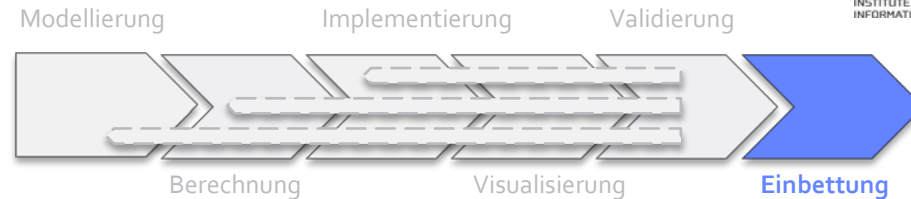


- ▶ Implementierung der Berechnungsalgorithmen
- ▶ Visualisierung befasst sich mit der Datenexploration
  - ▶ Aus den berechneten Ergebnissen müssen relevante Informationen extrahiert und interpretiert werden





- ▶ Wie verlässlich sind die berechneten Ergebnisse?
- ▶ Aufteilung in Validierung und Verifikation
- ▶ Validierung des betrachteten Modells durch u. A.
  - ▶ 1:1-Abgleich mit experimentellen Untersuchungen
  - ▶ Vergleichen der berechneten Ergebnisse mit den vorhergesagten Ergebnissen (Realitätstests)
  - ▶ Ermitteln, ob sich das angestrebte Resultat auch hinreichend eingestellt hat
  - ▶ Vergleich von Simulationsergebnissen unterschiedlicher Modelle
- ▶ Verifikation befasst sich mit der korrekten Arbeitsweise des Programms und Lösung des Modells
- ▶ Je nach Fehler muss der gesamte Prozess ab der Fehlerquelle erneut komplett durchlaufen werden

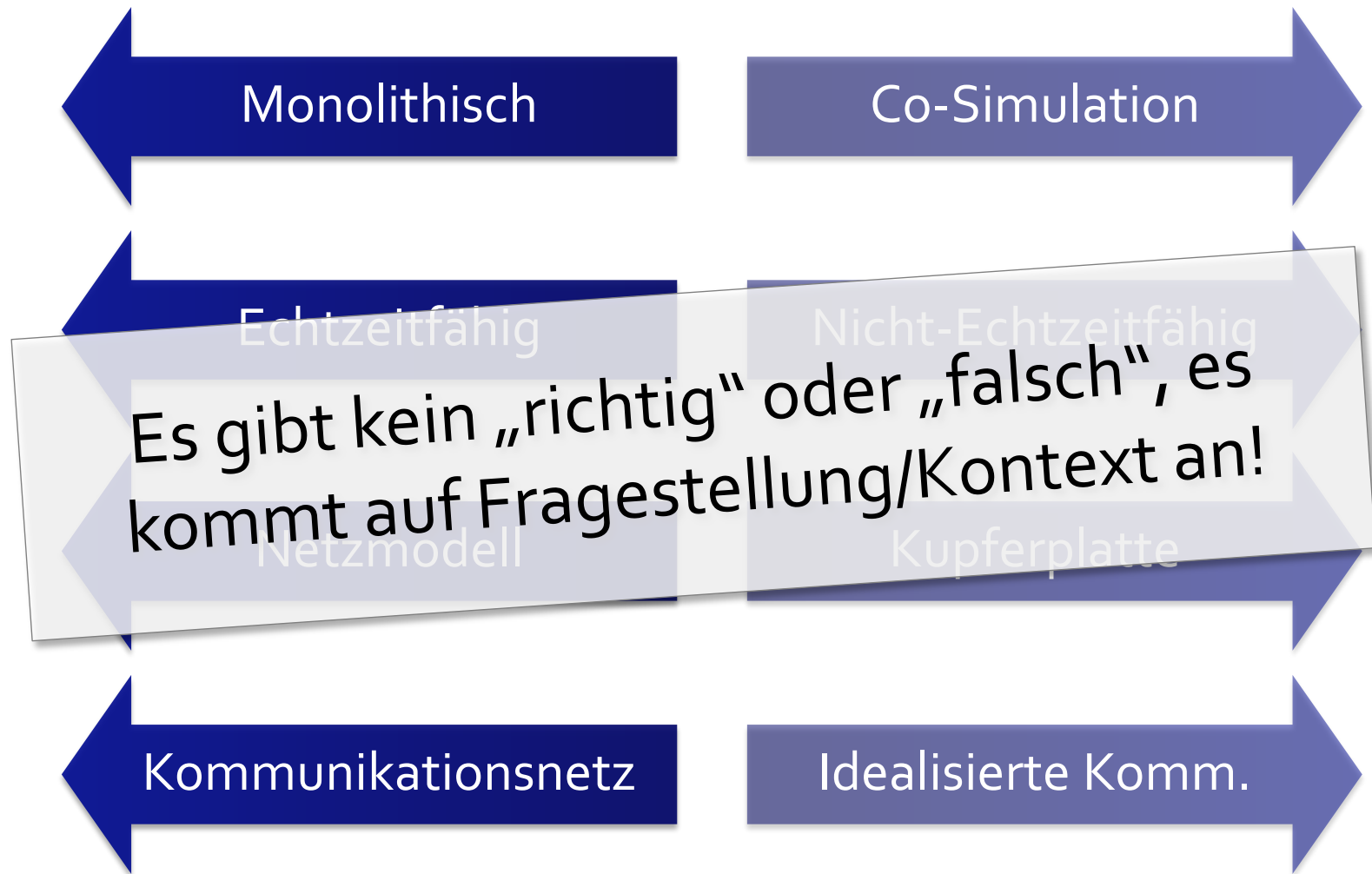


- ▶ Einbettung der fertigen Simulation in den Projektkontext
  - ▶ Schnittstellen
  - ▶ Testumgebungen
  - ▶ ...
- ▶ Relevante Faktoren bei einer Einbettung im betrieblichen Kontext:
  - ▶ Wie gliedert sich Simulation in die **Unternehmensprozesse** ein?
  - ▶ Wie gliedert sich Simulation in die **Unternehmensarchitektur** ein?
  - ▶ Welche **Inputdaten** werden für die Parametrierung gebraucht?
  - ▶ Welche **Ergebnisse** werden wo und wie weiterverarbeitet?
  - ▶ Welche **Modellgranularität** ist für die jeweilige Fragestellung passend?
  - ▶ Welche **nichtfunktionalen Anforderungen** (Performanz, Verfügbarkeit, ...) werden an die Simulation gestellt?

# SIMULATION IN DER DOMÄNE ENERGIE

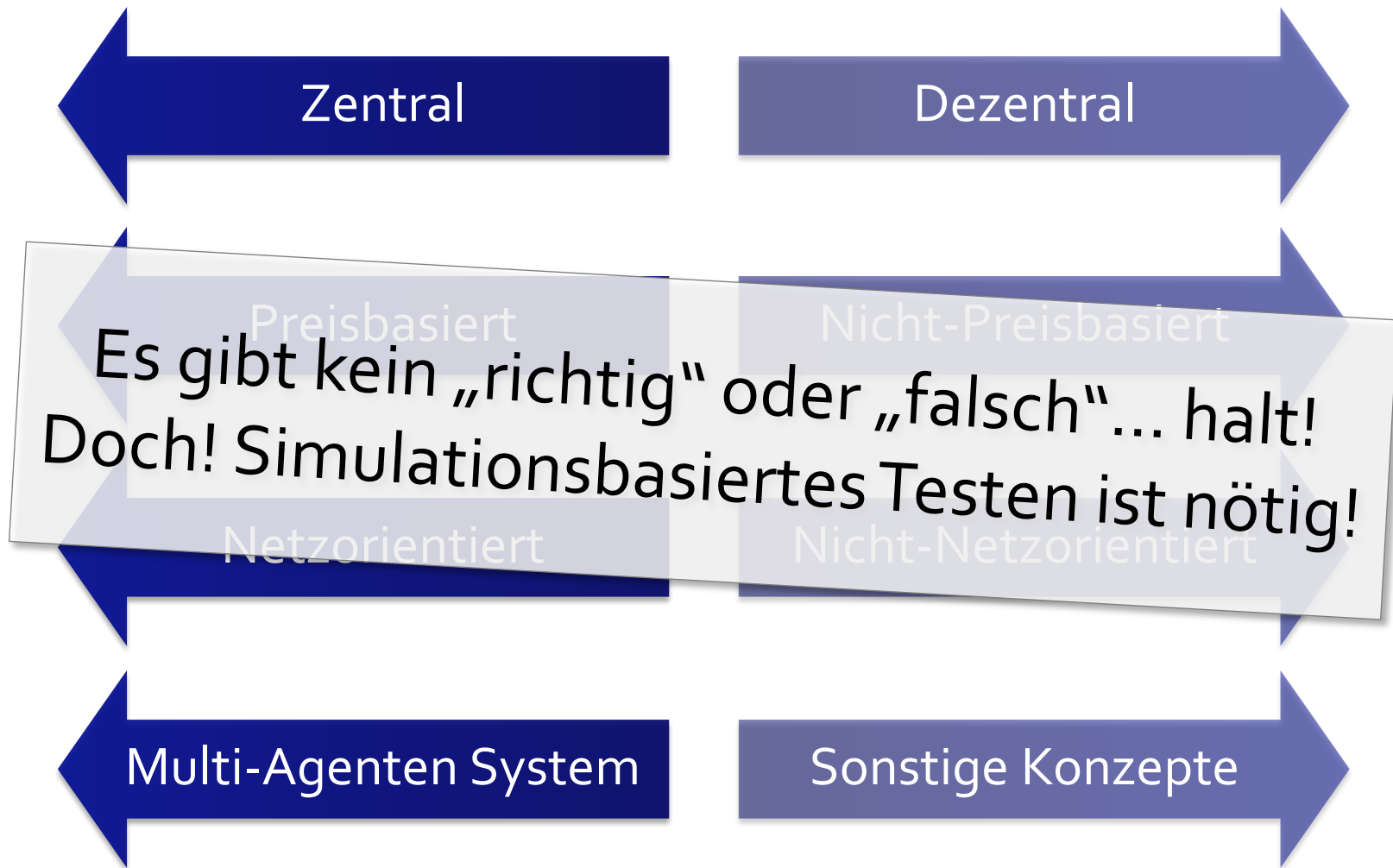
# Simulation von Smart Grids

## Kategorisierung



# Simulation von Smart Grids

## Steuerungskonzept



# Simulation von Smart Grids

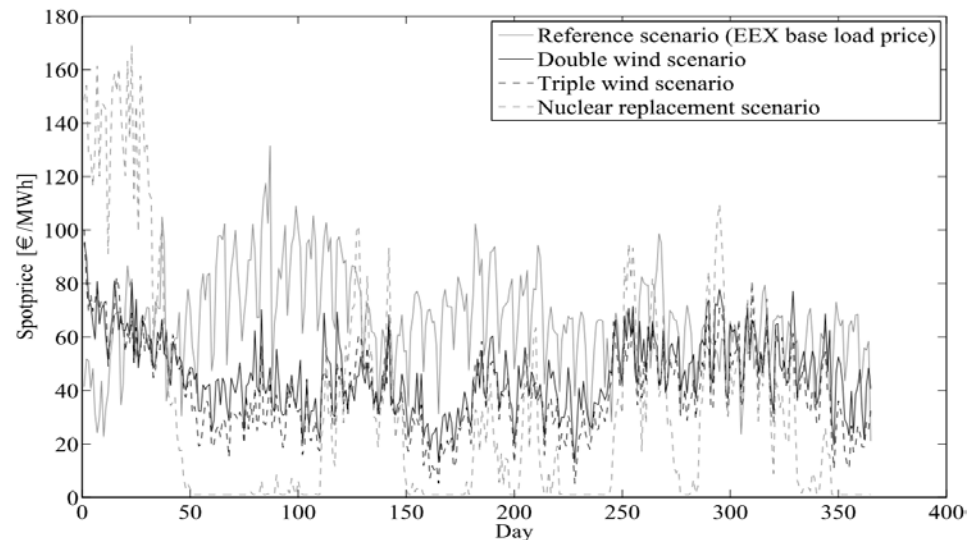
## Beispiel 1 – [WGA10]

- ▶ Agentenbasierte Modellierung des deutschen EEX-Marktes
- ▶ Kraftwerke als Agenten modelliert
- ▶ Ziel: Profitmaximierung
- ▶ Verhalten: XCS (accuracy-based LCS), d.h. selbstlernendes Verhalten + gen. Algorithmen
- ▶ Wind als externe Größe (nicht steuerbar)

# Simulation von Smart Grids

## Beispiel 1 – [WGA10] (forts.)

- ▶ Demonstration mit 2 Fallstudien
- ▶ 1. Verdopplung und Verdreifachung der Windeinspeisung von 2008 (23,6 GW)
- ▶ 2. 8 Millionen E-Fahrzeuge



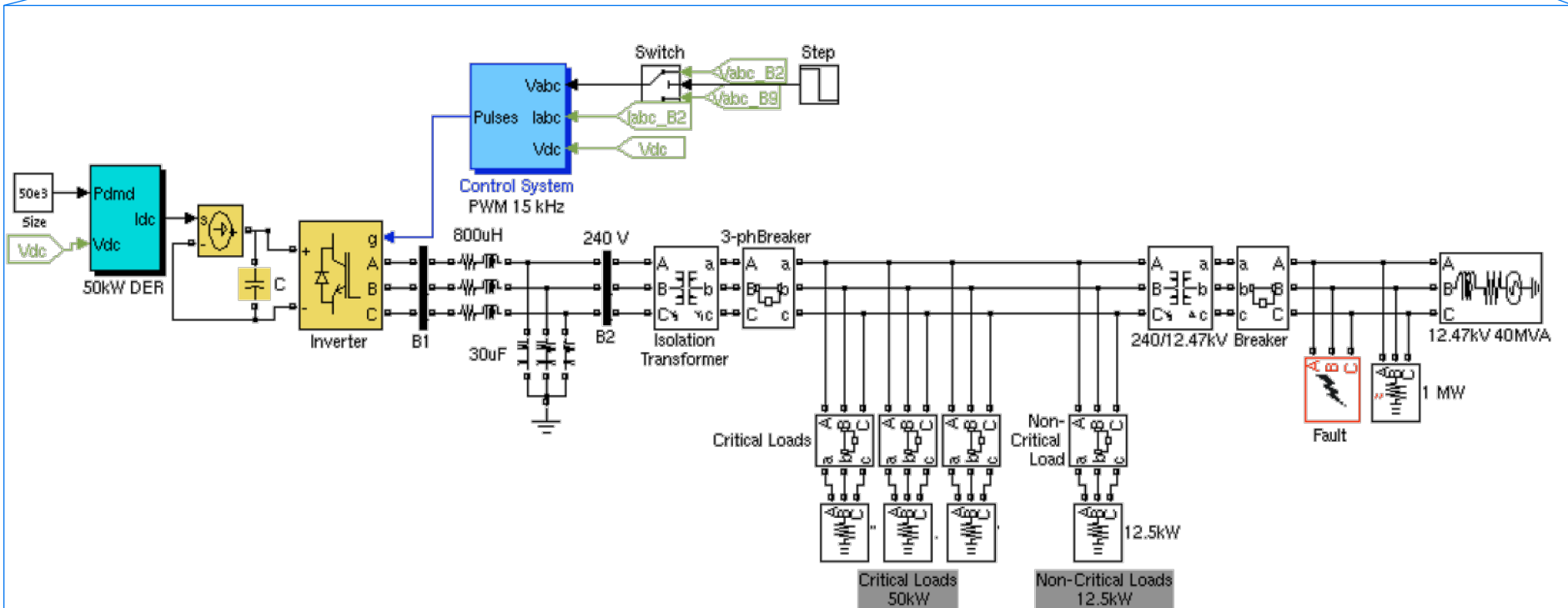
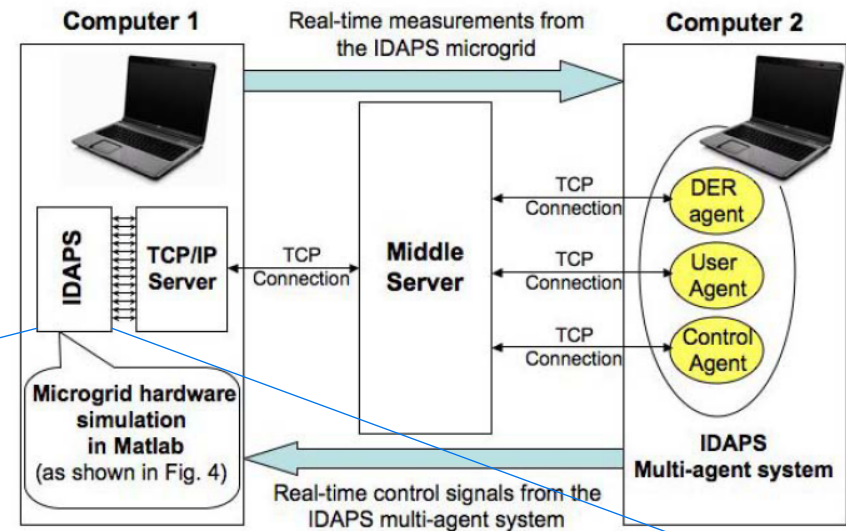
## Beispiel 2 – IDAPS (Intelligent Distributed Autonomous Power System)

- ▶ IDAPS Multi-Agenten System (MAS) hat 2 Betriebsmodi:
  - ▶ Normalbetrieb: DSM auf Preissignalbasis
  - ▶ Inselbetrieb: Steuerung der internen Generatoren und Priorisieren der Lasten
- ▶ Simulation eines Verteilnetzes als Testbett für das IDAPS MAS
  - ▶ Netz- und Anlagenmodelle in Matlab/Simulink
  - ▶ MAS kommuniziert über TCP-IP mit Matlab



# Simulation von Smart Grids

## Beispiel 2 – IDAPS (forts.)



# Simulation von Smart Grids

## Beispiel 3 – VPNET

- ▶ Co-Simulationsframework zur Betrachtung von Strom- und Kommunikationsnetz
- ▶ Ziel:
  - ▶ Auswirkungen der Performanz des Telekommunikationsnetzes auf Verhalten und Stabilität des Stromnetzes analysieren
  - ▶ Anforderungen des Stromnetzbetriebes an das Telekommunikationsnetz ermitteln

# Simulation von Smart Grids

## Beispiel 3 – VPNET (forts.)

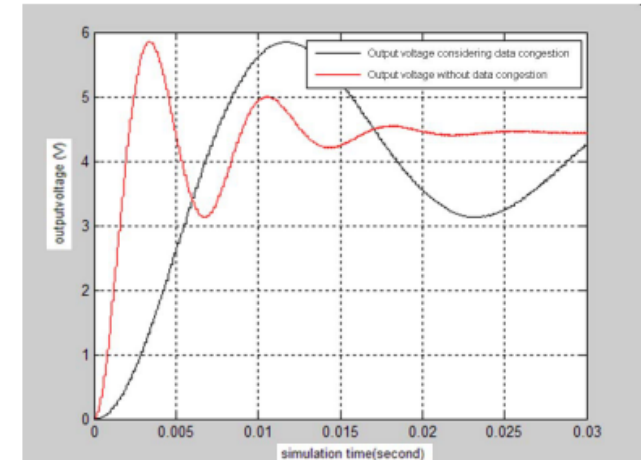
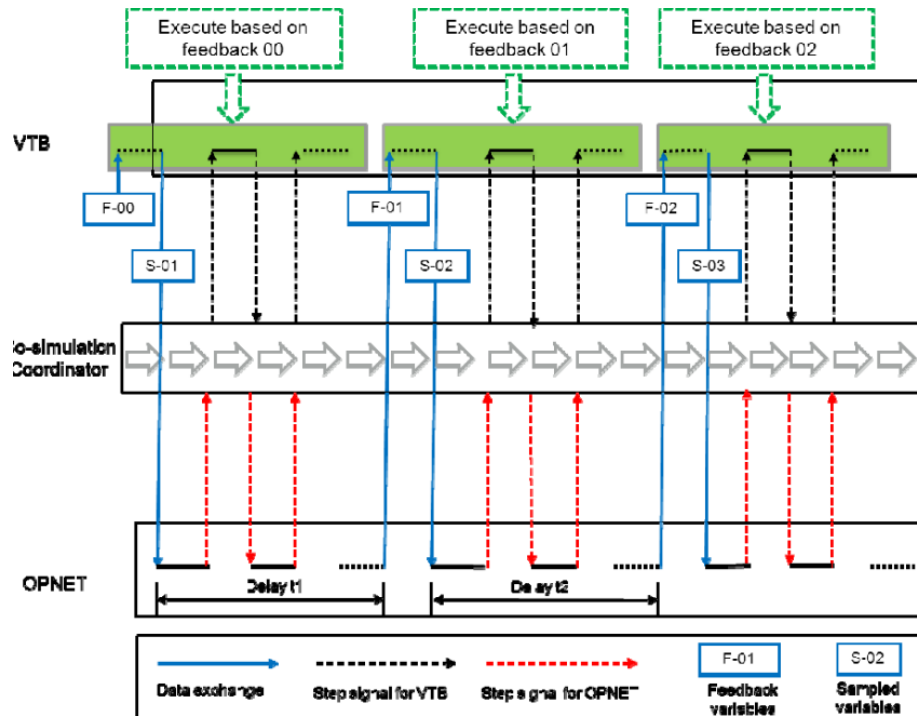


Figure 12. Output voltage considering data congestion

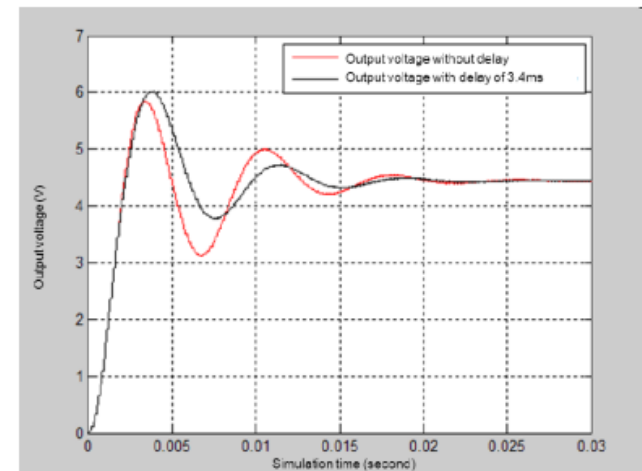
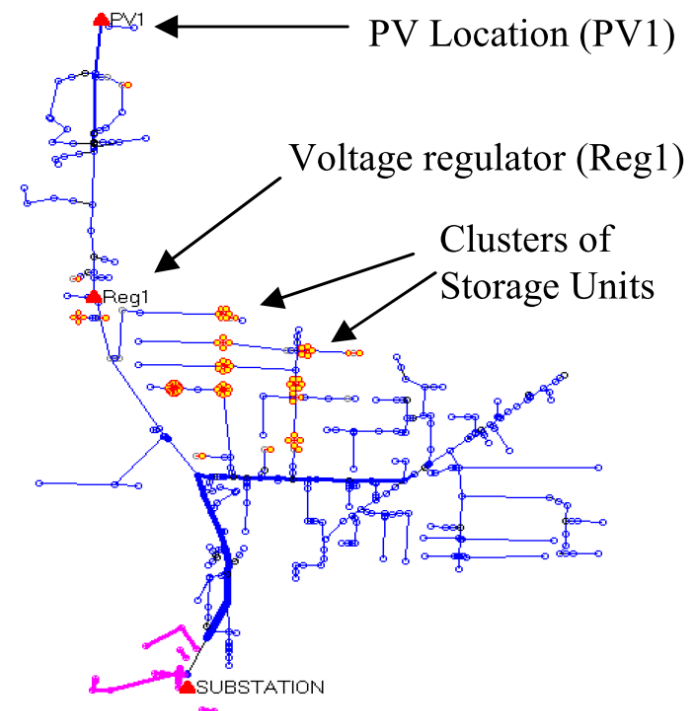


Figure 13. Output voltage with pure delay in VTB

# Simulation von Smart Grids

## Beispiel 4 – [Go10]

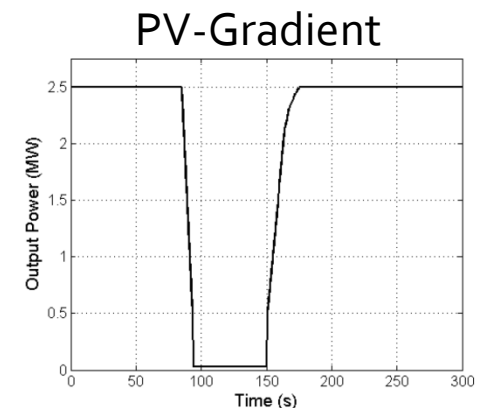
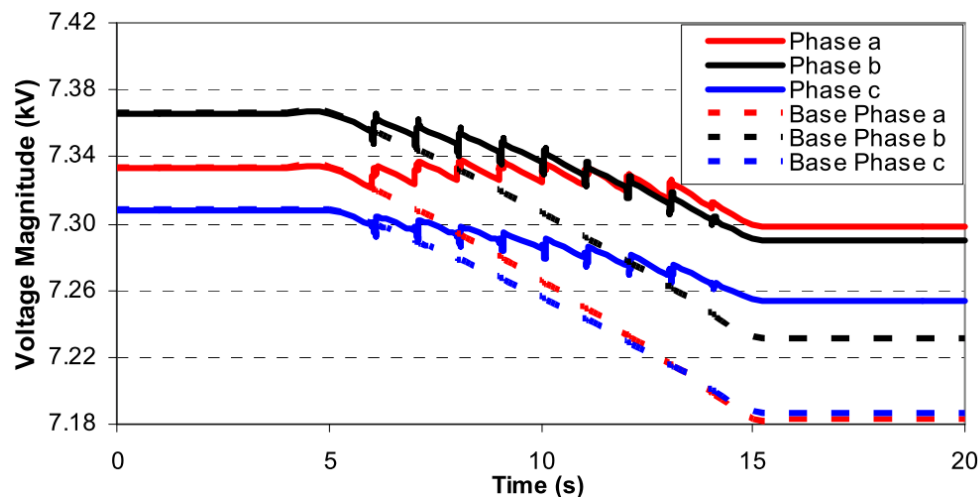
- ▶ Co-Simulation zur Untersuchung von steuerbaren stationären Speichern, um PV-Gradienten zu dämpfen
- ▶ Netzsimulation mit OpenDSS
- ▶ Telekom. Sim mit NS-2
- ▶ 2.5 MW PV
- ▶  $84 \times 25 \text{ kW} = 2.1 \text{ MW}$  Speicher



# Simulation von Smart Grids

## Beispiel 4 – [Go10] (forts.)

- ▶ Geeignete Position der Speicher mit „reiner“ Netzsimulation adressierbar
- ▶ Ansprechverhalten erfordert Betrachtung des Kommunikationsweges (WiFi)



# Simulation von Smart Grids

## Übersicht

Projekt	Preisbasiert	MAS	Co-Simulation	Echtzeit	Stromnetz	Kommunikation
[WGA10]	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
IDAPS [PFR09]	Nein	Ja	Nein	Ja	(Ja)	Echt (TCP/IP)
VPNET [LMLD 11]	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Simuliert (TCP/IP)
[Go10]	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Simuliert (WiFi)
[LSW10]	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Simuliert (UDP)
[De10]	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein
[Ra11]	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
PowerMatcher [Ko12]	Ja	Ja	?	?	?	?
[Kuo8]	Nein	(Nein)	Nein	Nein	Nein	Nein
[Be10]	(Nein)	Nein	Ja	Ja	Ja	Simuliert (DSL)
[Hoo6]	-	Ja	Ja	?	Ja	Simuliert
...			...	...	...	...



Simulation im OFFIS

# **DAS SIMULATIONSFRAMEWORK MOSAIK**



- **Vertrauen** in das Modell – das Verhalten ist bekannt
- Implementierung und Validierung war **aufwändig**
- Einarbeitung in das Modell hat **Zeit** gekostet
- Das Rad nicht neu erfinden: **Bewährte** Modelle (Lastflusstools)
- ...

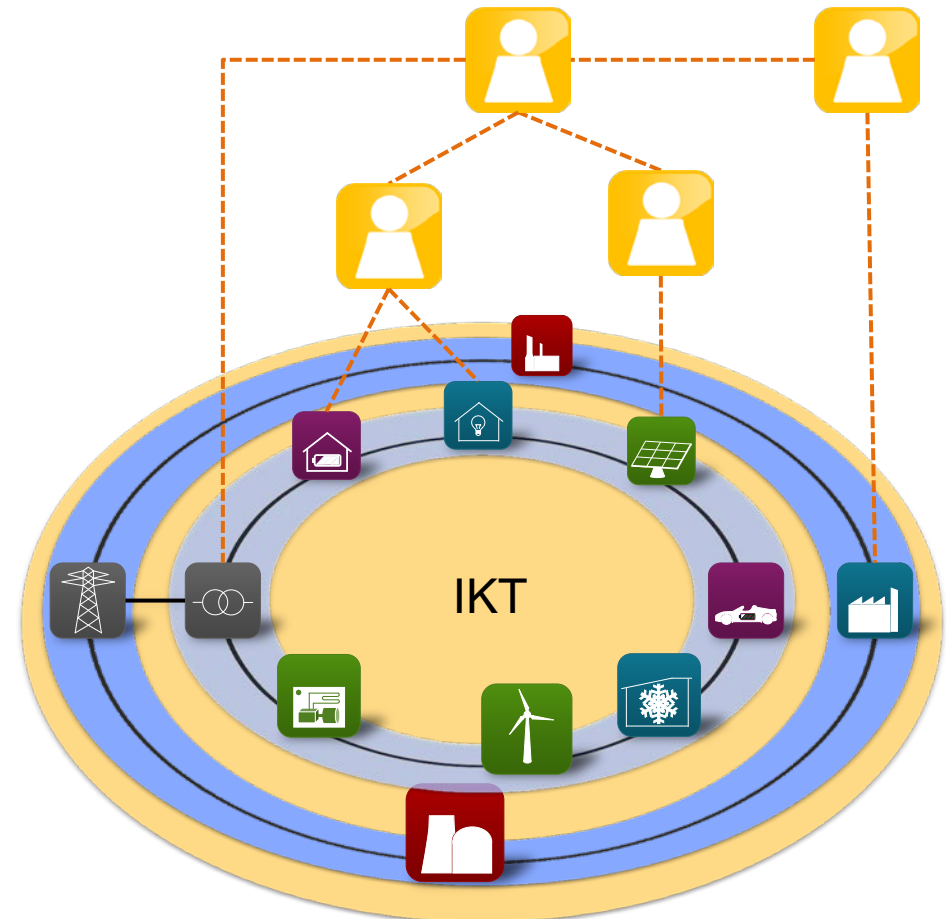




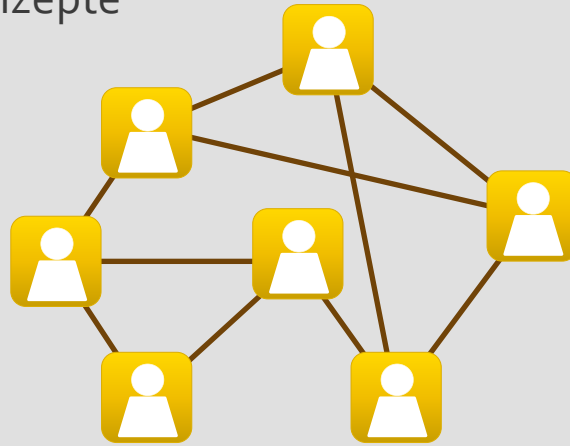


Multi-Agent Systems are well suited for Smart Grid control tasks due to their inherent architectural properties. [JB03]

- Supply-Demand Matching
- Spannungshaltung
- Schutzmechanismen
- ...



## Steuerungskonzepte

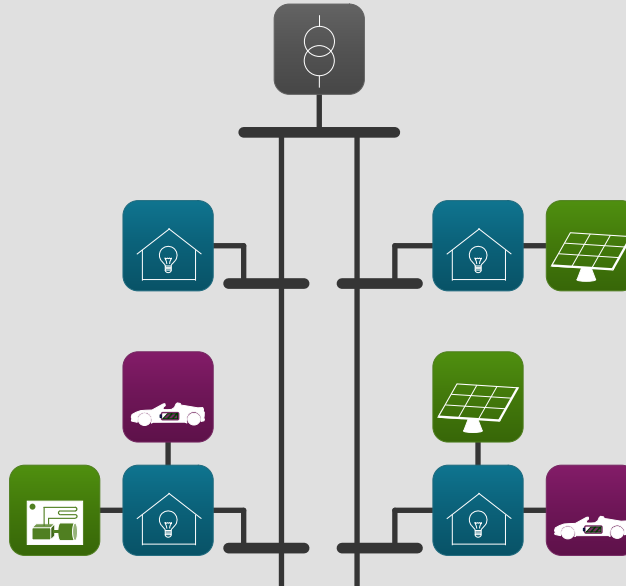


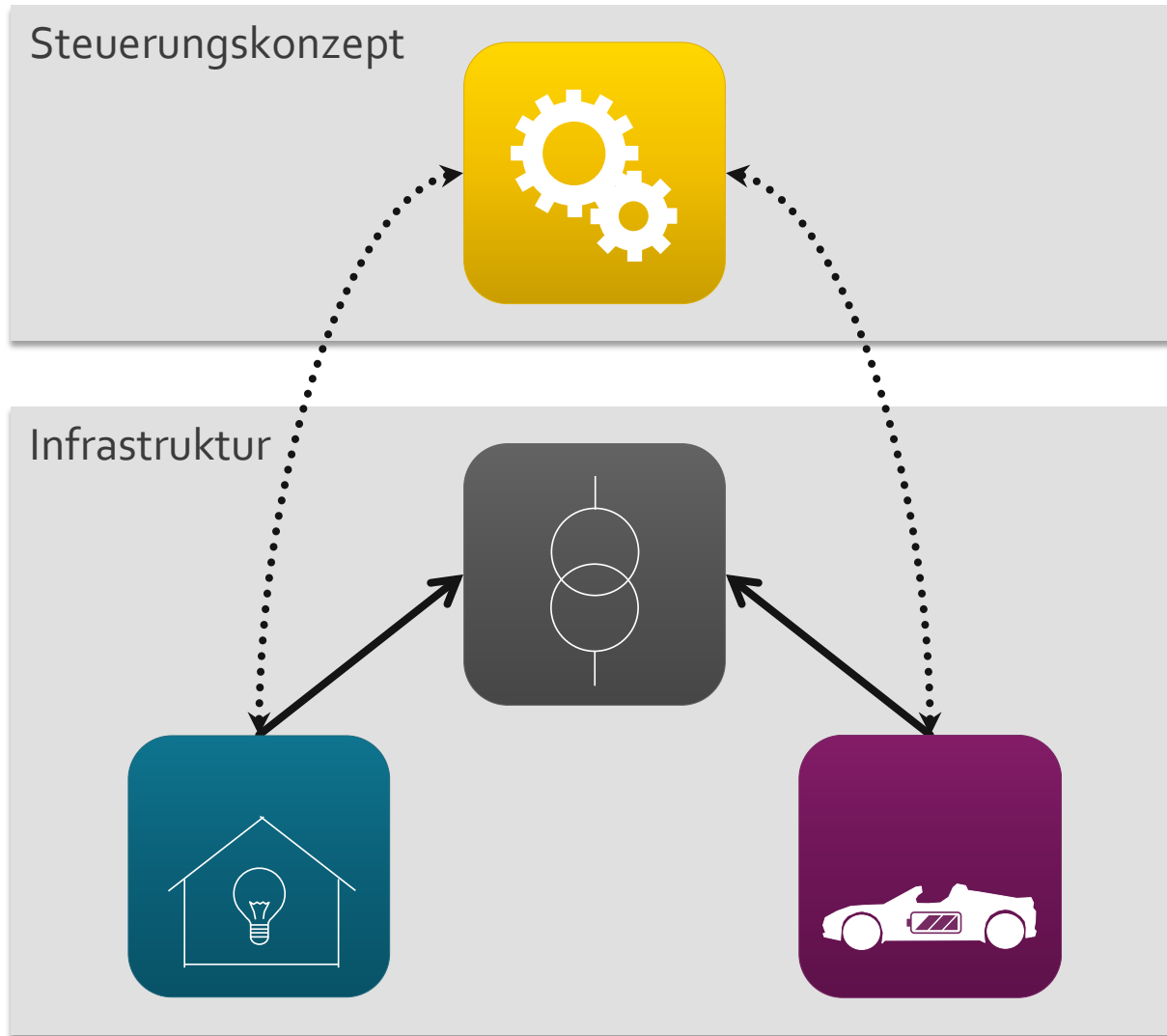
Simulationsdaten



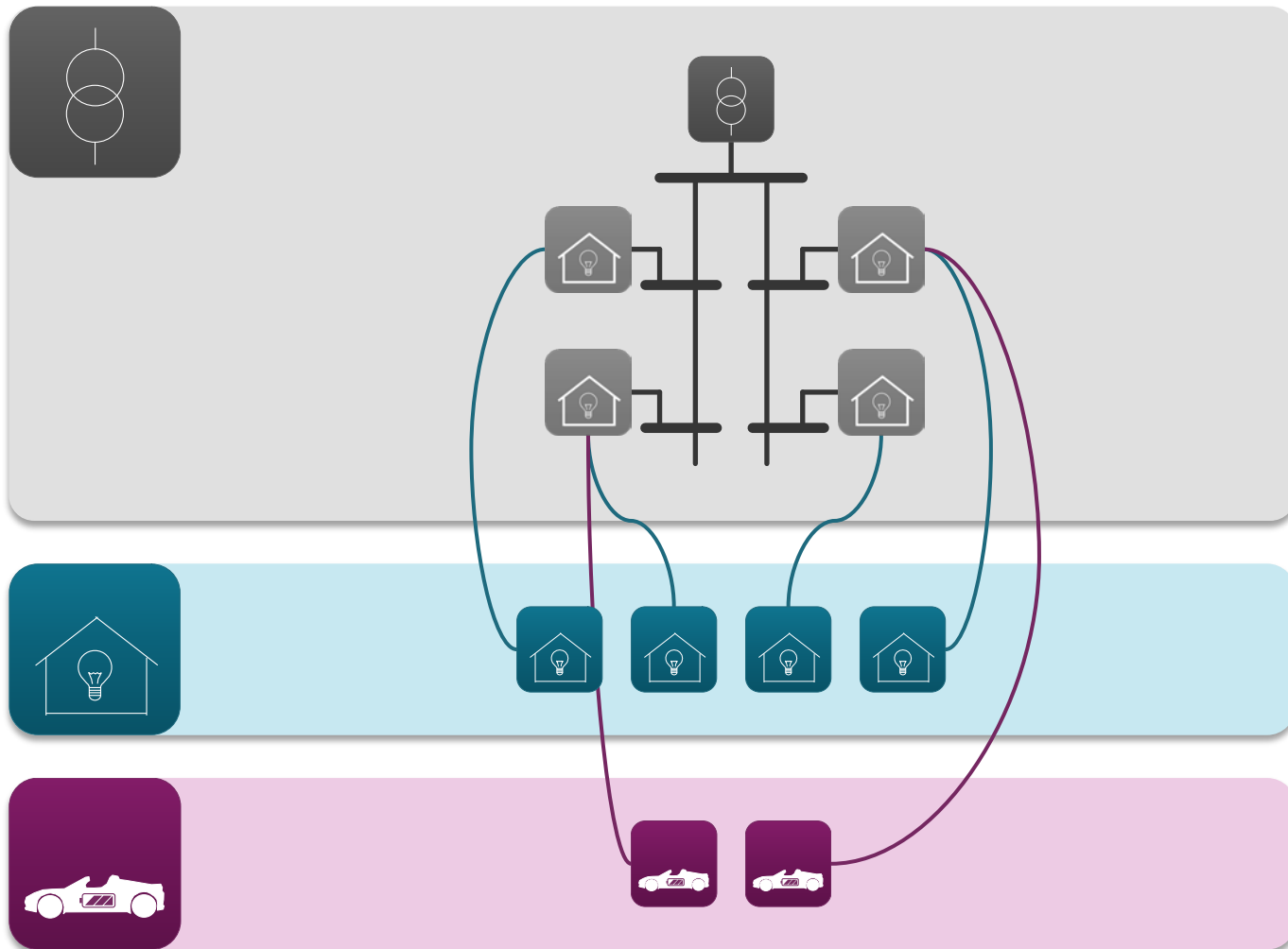
Steuerwerte

## Infrastruktur

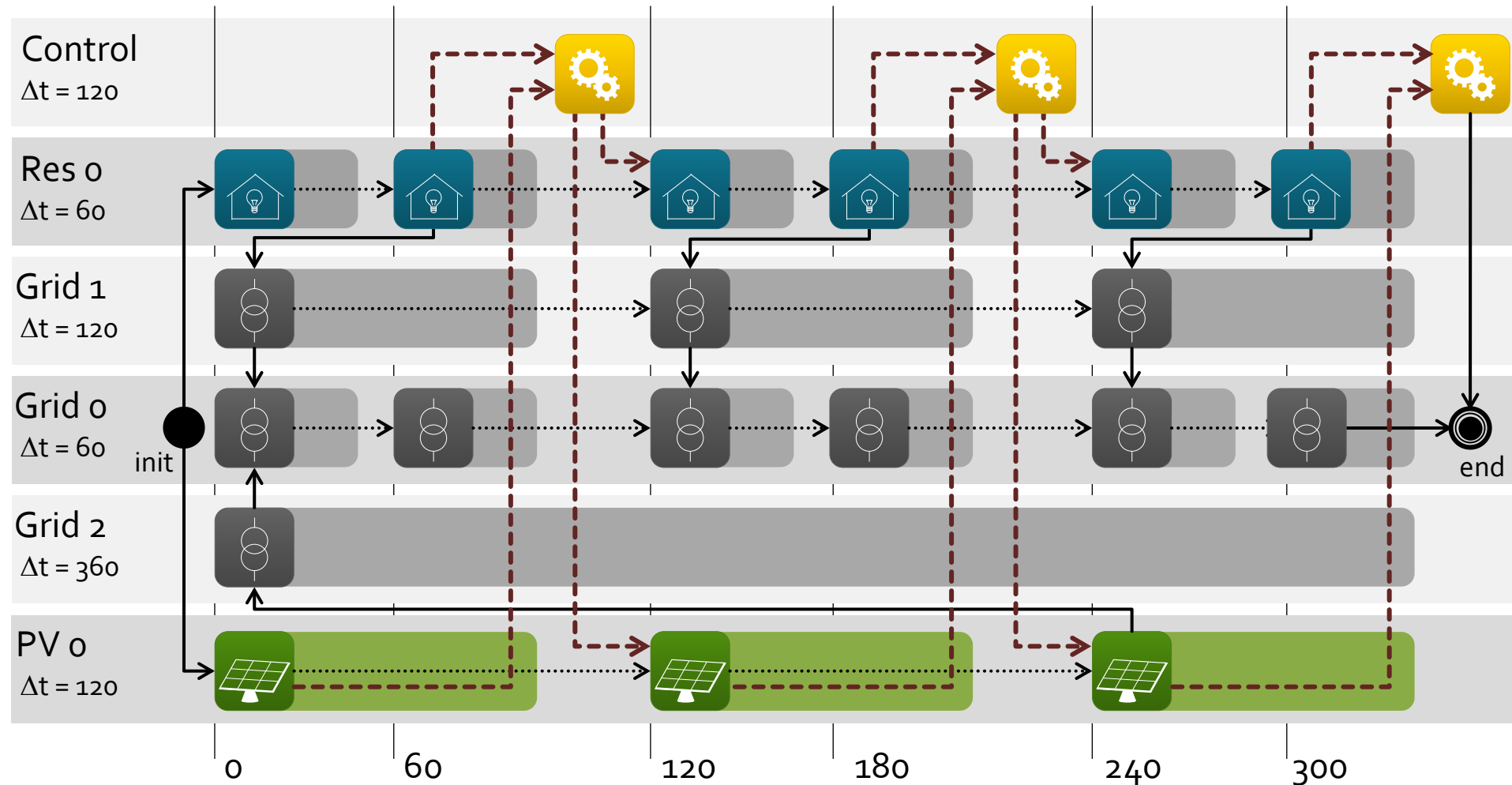




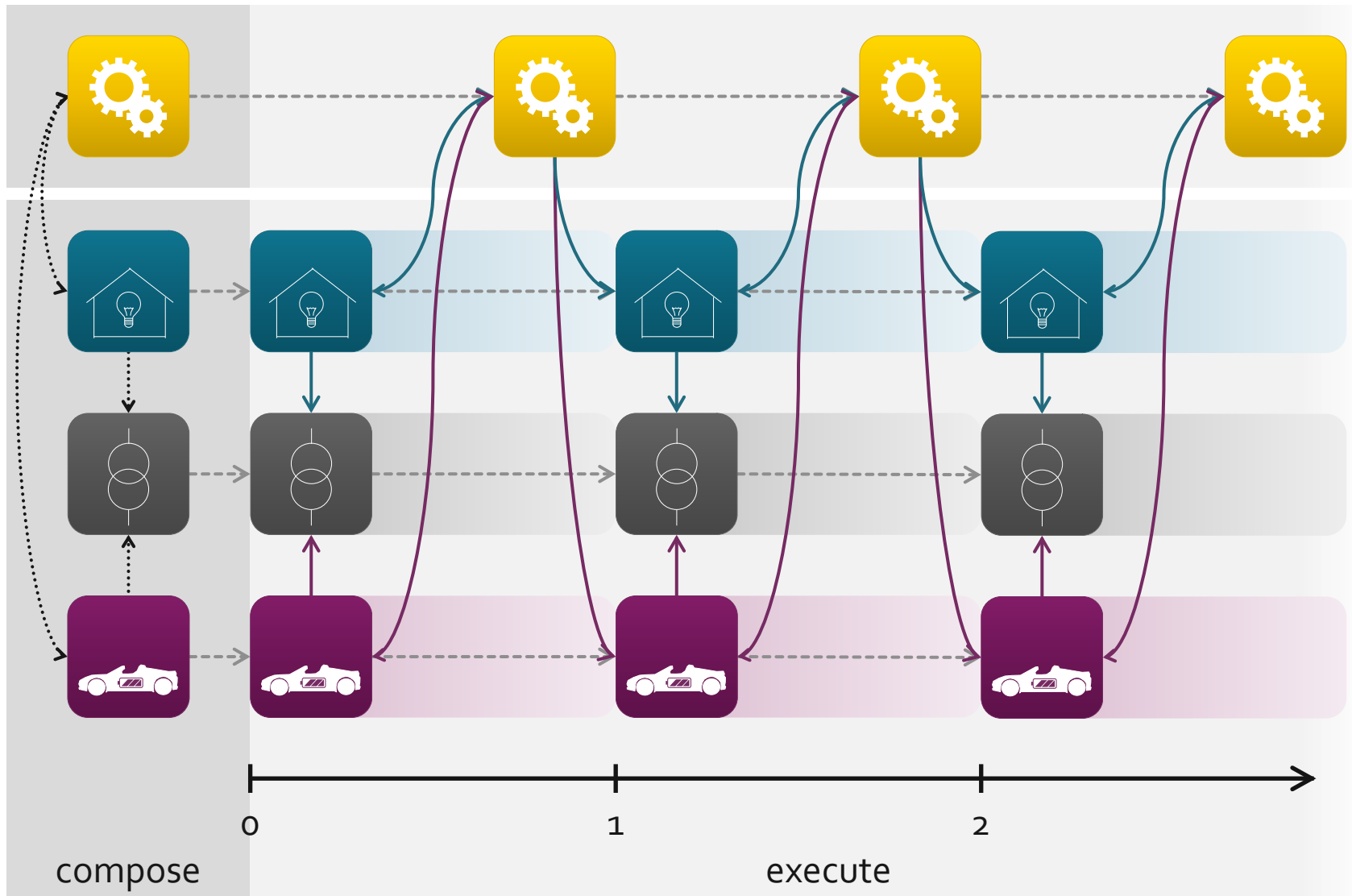
# Komposition



# Ablaufplan

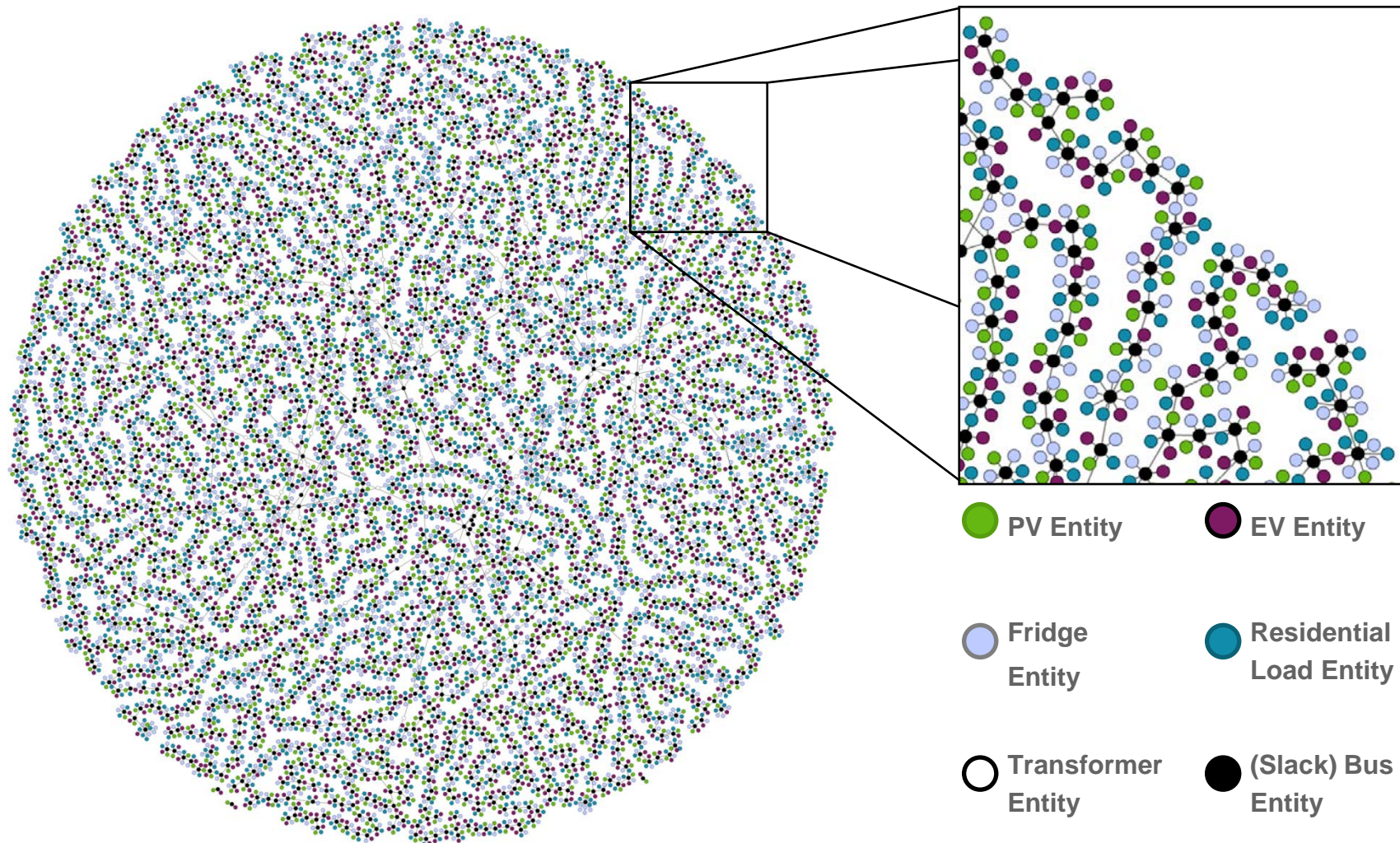


# Ausführung



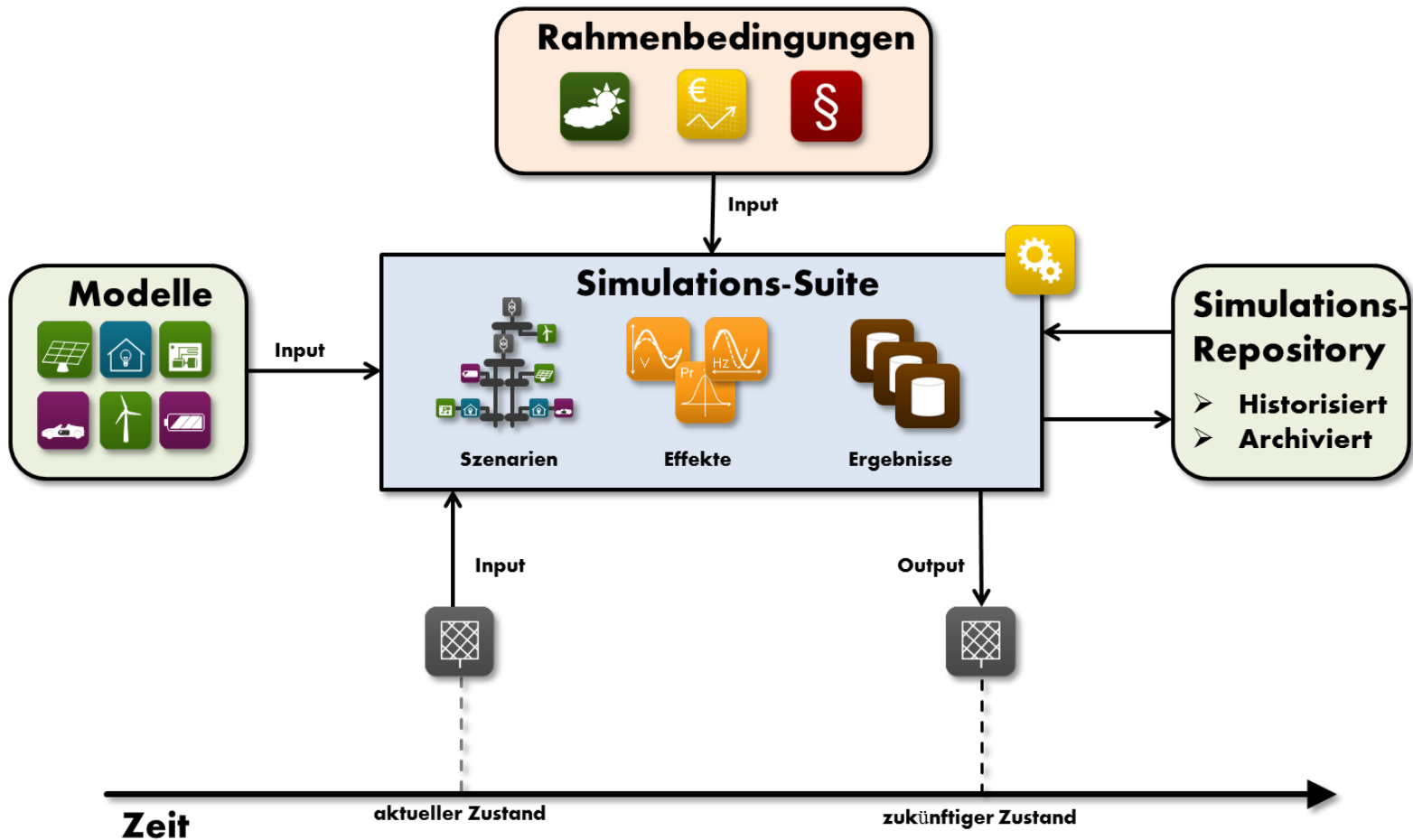


# Szenarien im großen Maßstab





# Gesamtsystem





Control layer

Schnittstelle zur Interaktion mit den simulierten Entitäten

Composition layer

Interpretation der Szenariomodelle, automatische **Komposition** und **Ausführung**

Scenario layer

Formale **Modellierung von großen Szenarien** auf Basis des Semantic Layer

Semantic layer

Formale **Beschreibung von** Struktur und Semantik der **Simulatoren** und deren **Modelle**

Syntactic layer

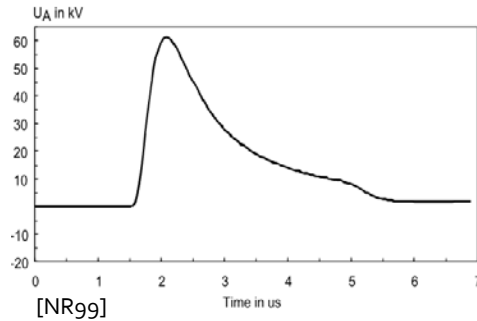
Grundlegende, syntaktische Interoperabilität durch wohldefinierte **Simulator API**

Technical layer

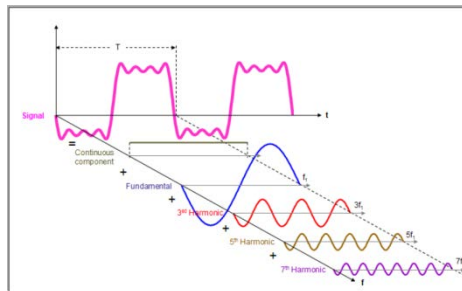
Stellt Infrastruktur bereit, um Simulatoren zu finden und zu Starten

# Anwendungsgebiet

Transienten

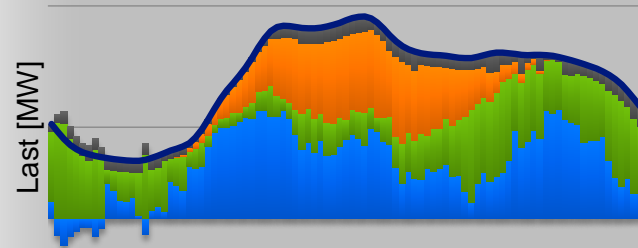
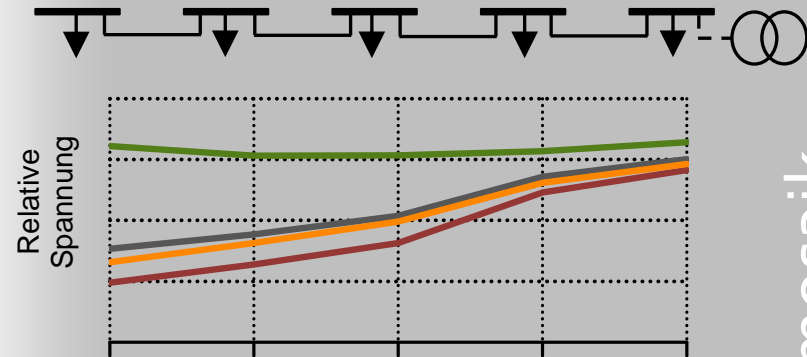


Harmonische



[Herog]

Simulation im  
Zeitbereich



Simulation im  
Frequenz-  
bereich

Im Fokus von mosaik

1° bei 50 Hz

1 Drehung

1 Sekunde

1 Minute

1 Stunde

1 Tag

Auflösung

Simulation im OFFIS

# BEISPIEL: ENERGEOPLAN

### Energieversorgung

- Energiebedarf in der Zukunft?
- Deckung über welche Quellen?
- Domänen Strom, Gas, Wärme?
- Speicher zur Lastverschiebung?
- Steuerung verschiebbarer Lasten?



### Kommunalplanung

- Ausbau
  - Wo?
  - Wie?
- Welche Potentiale?
  - Raumpotentiale
  - Energiepotentiale



### Netzplanung

- Elektrische Lasten?
- Einspeisung aus dezentralen Netzabschnitten?
- Fluktuationsverhalten der dezentralen Anlagen?



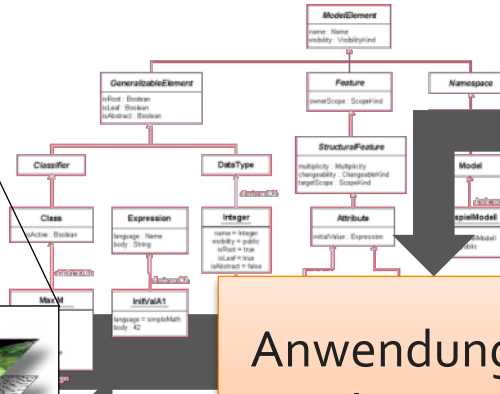
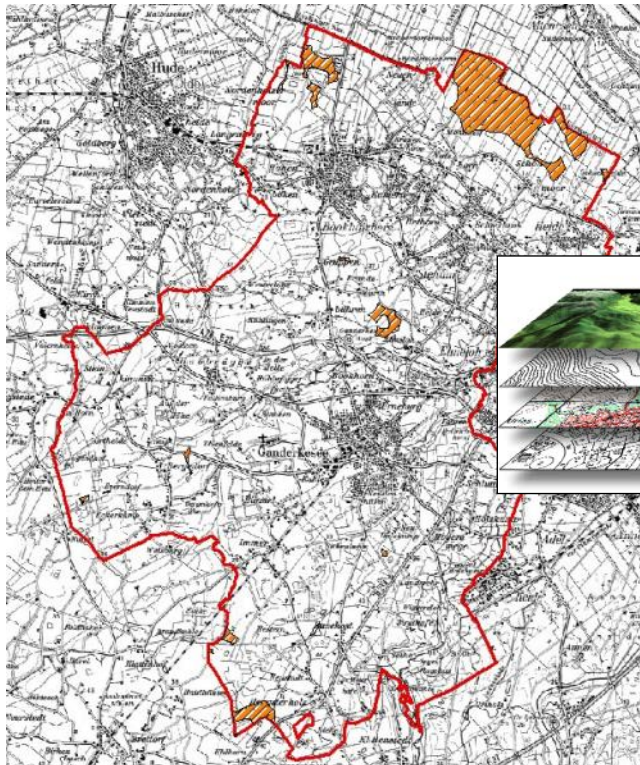
# Ziel und Methodik

Konzeption und prototypische Implementierung eines Software-Werkzeugs

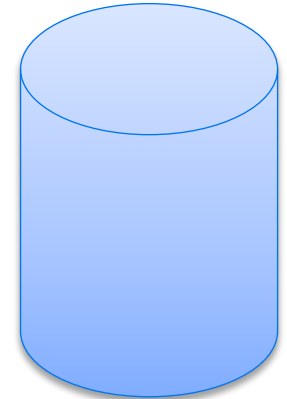


# Planungsvorgaben → Potentialanalyse

## Raum zu Energie



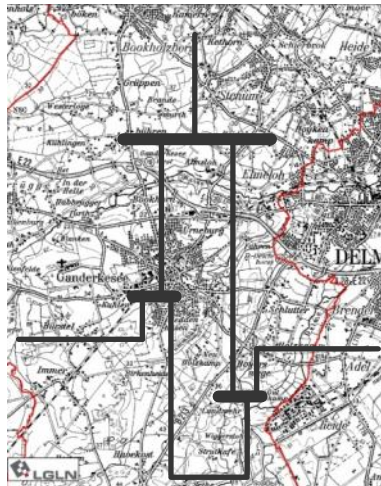
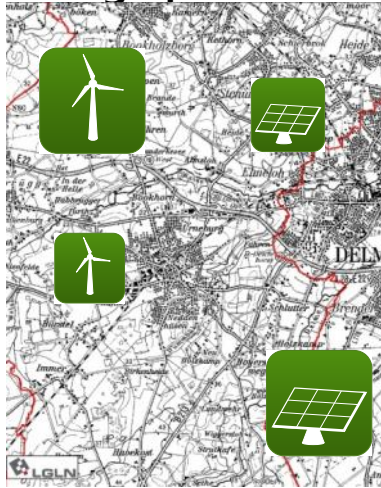
Anwendung von  
Planungs-  
vorgaben



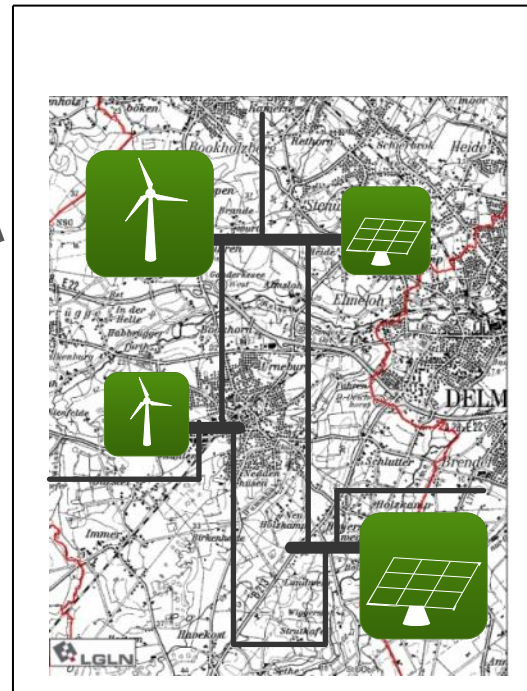


# Räumliche Integration

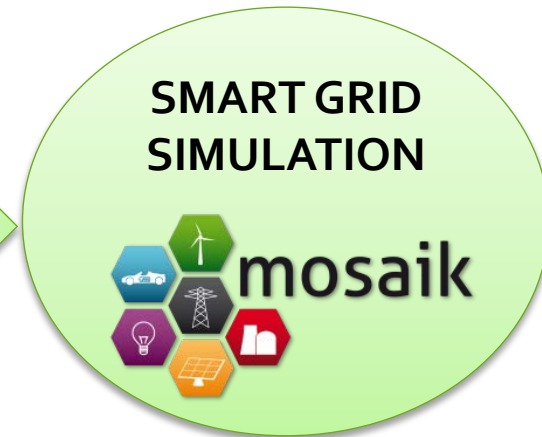
## Raumanalyse des Energiepotentials



**Mittelspannung**



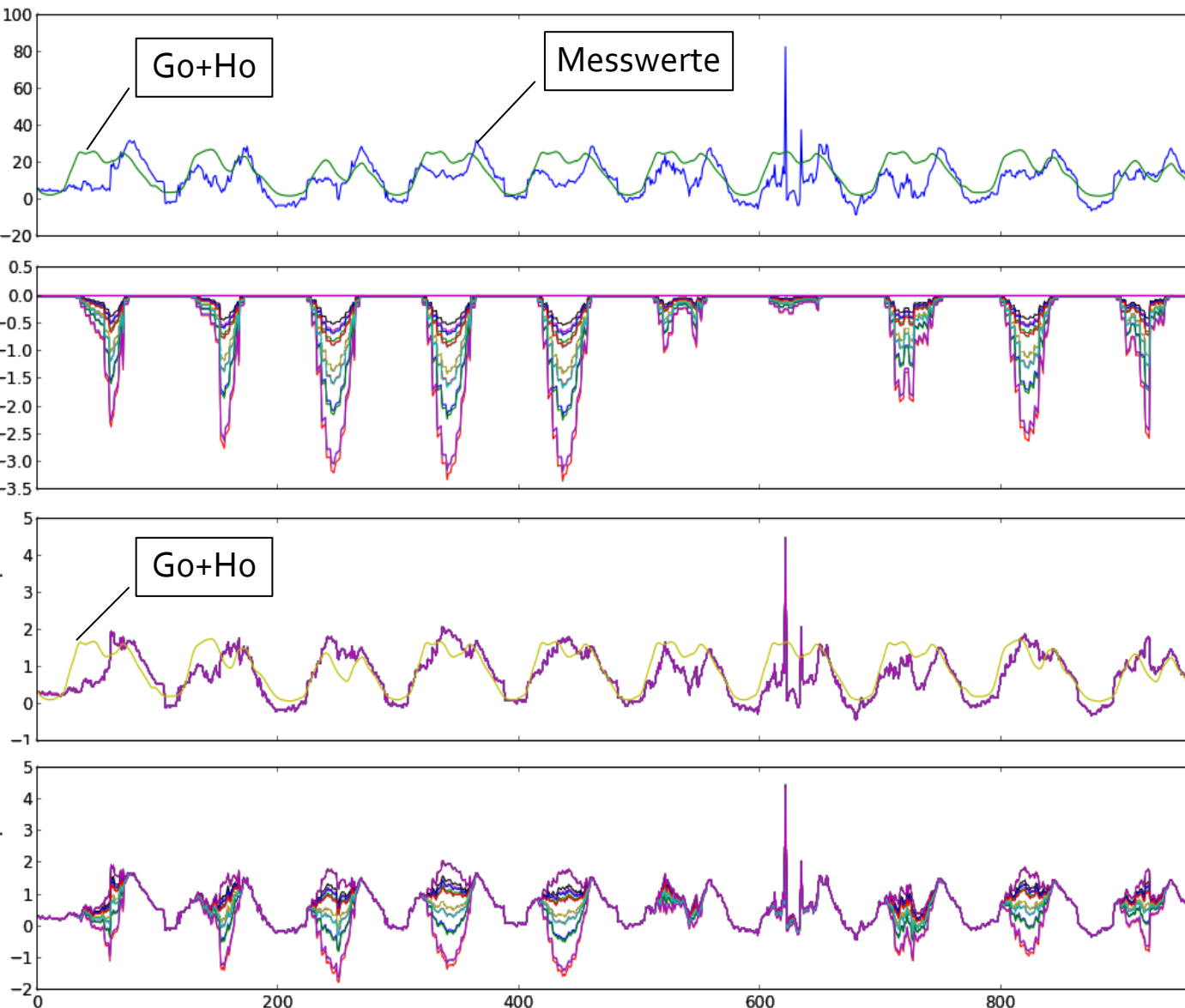
**Kombinierte Szenarien  
Co-Szenarien**







# Approximation der Ortsnetzauslastung



Gesamtverbrauch (A)

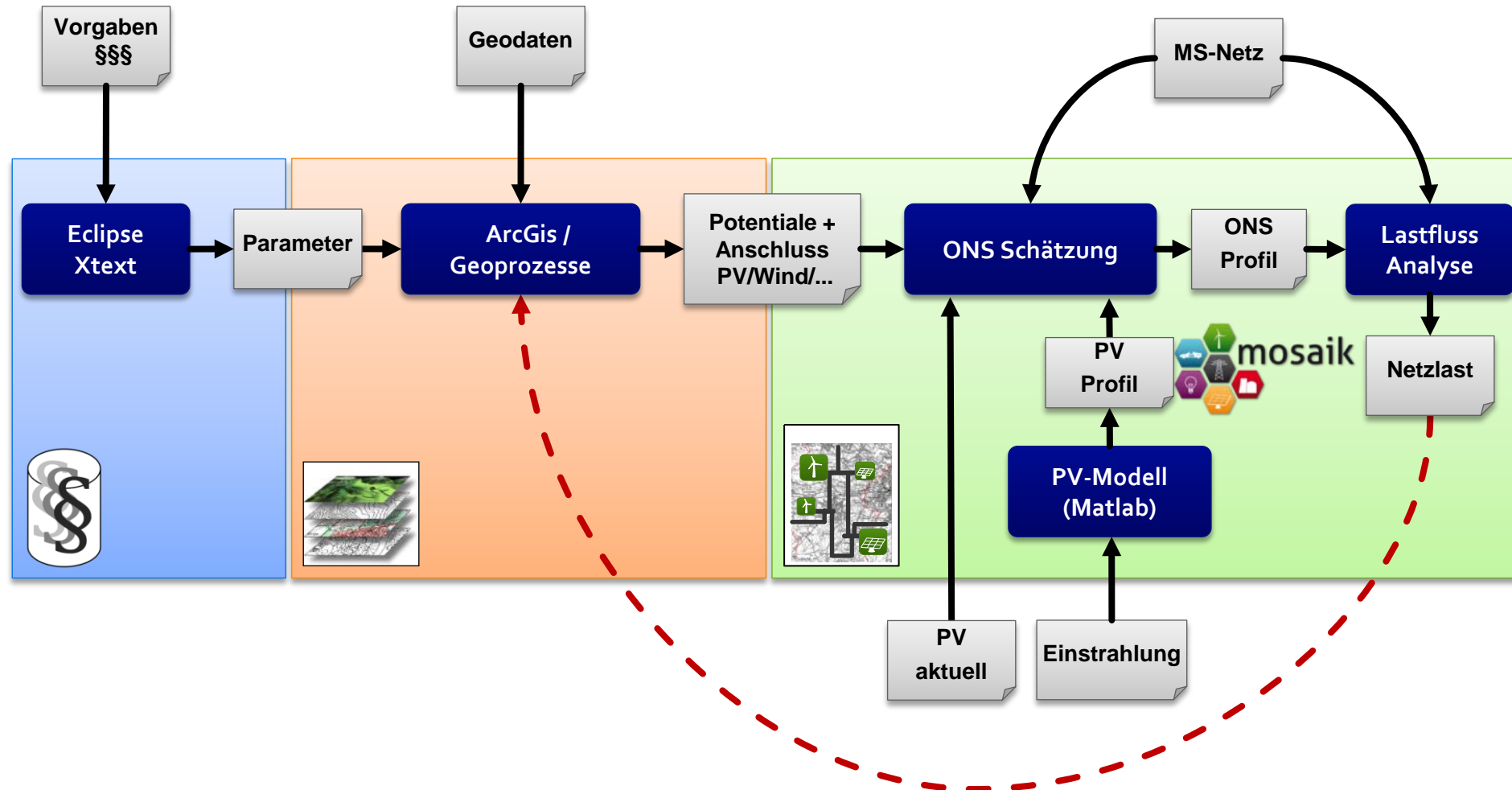
PV Modell (A)

Sonstige Lasten (A)

Trafolast (A)



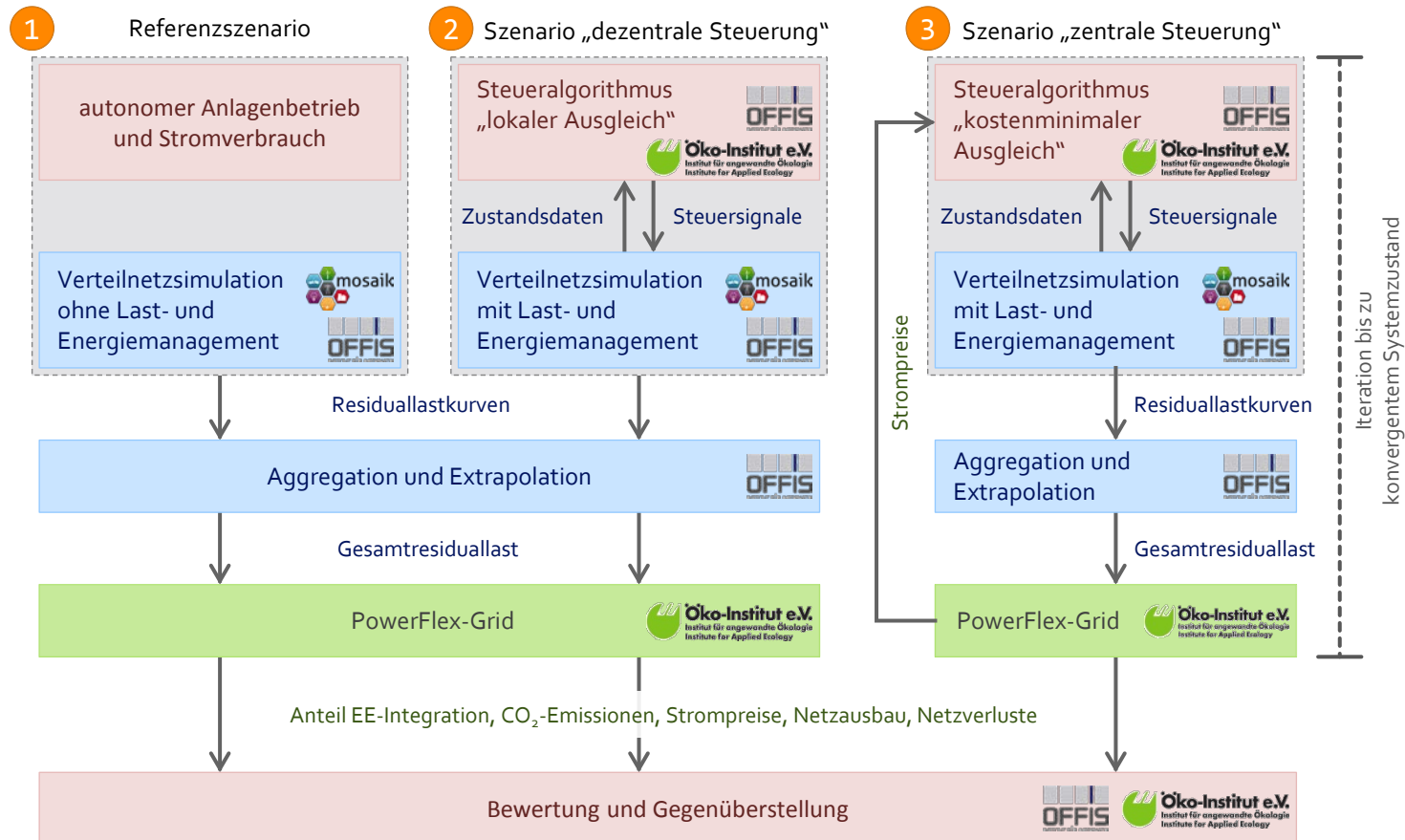
# Die Werkzeugkette



Simulation im OFFIS

# BEISPIEL: D-FLEX

## Dezentral und zentral gesteuertes Energiemanagement auf Verteilnetzebene zur Systemintegration erneuerbarer Energien



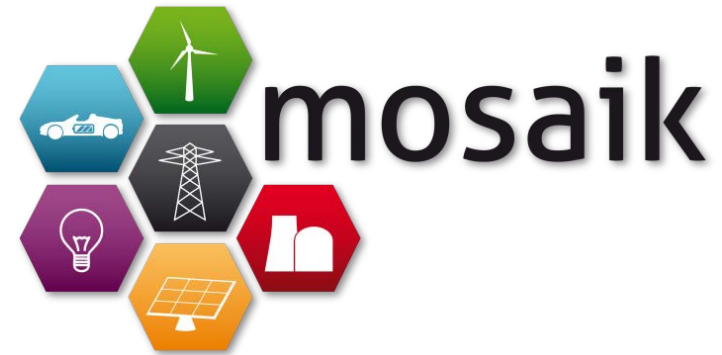
# Beschreibung der Szenarienanalyse

	Referenzszenario	Szenario „dezentrale Steuerung“	Szenario „zentrale Steuerung“
<b>Ziel</b>	<b>Kostenminimaler Ausgleich</b> von Einspeisung und Verbrauch <b>ohne</b> Last- und Erzeugungsmanagement auf Verteilnetzebene	Vorrangig <b>lokaler Ausgleich</b> von Einspeisung und Verbrauch <b>mit</b> Last- und Erzeugungsmanagement auf Verteilnetzebene	<b>Kostenminimaler Ausgleich</b> von Einspeisung und Verbrauch <b>mit</b> Last- und Erzeugungsmanagement auf Verteilnetzebene
<b>Netzaus- und umbau</b>	<b>Kein</b> Umbau der Verteil-netzebene zu Smart Grids  Klassischer Netzausbau auf Verteil- und Übertragungsnetzebene	Umbau der Verteilnetz-ebene zu Smart Grids  Reduzierter Netzausbau auf Übertragungsnetzebene	Umbau der Verteilnetz-ebene zu Smart Grids  Vollständiger Netzausbau auf Übertragungsnetzebene
<b>Erwarteter Flexibilitätsbedarf</b>	Flexibilität im Kraftwerkspark reicht für vollständige EE-Integration nicht aus	Höher, da großräumiger Ausgleich zwischen den Verteilnetzebenen erst nachrangig erfolgt.	Geringer, da lokale Einspeise- und Nachfrageschwankungen zunächst großräumig ausgeglichen werden.
<b>Erwarteter Vorteil</b>		Geringerer überregionaler Stromaustausch führt zu geringeren Netzausbaukosten und Netzverlusten auf Übertragungsnetzebene  Geringere Netzverluste führen zu geringeren CO <sub>2</sub> -Emissionen	Geringere Stromgestehungskosten zur Deckung der Stromnachfrage  Geringerer lokaler Flexibilitätsbedarf zum Ausgleich von EE-Einspeisung und Verbrauch
<b>Erwarteter Nachteil</b>	Höhere CO <sub>2</sub> -Emissionen und geringere EE-Integration	Höhere Stromgestehungskosten zur Deckung der Stromnachfrage  Höherer lokaler Flexibilitätsbedarf zum Ausgleich von EE-Einspeisung und Verbrauch	Höherer überregionaler Stromaustausch führt zu höheren Netzausbaukosten und Netzverlusten auf Übertragungsnetzebene  Höhere Netzverluste führen zu höheren CO <sub>2</sub> -Emissionen

# Live Demo



- **Die Komplexität der Verteilnetze stößt durch die Energiewende und die damit verbundenen Änderungen an die Grenzen von Verstehen und Beherrschbarkeit**
  - Planung/Ausbau, Untersuchung von Effekten, ausfallsicherer Betrieb, Überwachung, kapazitive Auslastung
- **Einsatz von Simulations- und Modellierungs-Technologien und -Konzepten von Verteilnetzen, deren Komponenten und äußeren Einflüssen**
  - Entwicklung einer zentralen, integrativen Simulations-Suite und die anschließende Integration existierender und neuer Modelle
- **Kosten-Nutzen-Bewertung von Ausbauoptionen in der Netzplanung, Optimierter Einsatz der vorhandenen Infrastruktur, Analyse von Veränderungen ohne direkt in das Netz einzugreifen, Risikominimierung bei der Installation neuer Komponenten, Vergleich von Steuerungskonzepten**



# KONTAKT

---

Dr.-Ing. Sebastian Rohjans  
OFFIS – Institut für Informatik,  
F&E Bereich Energie  
[rohjans@offis.de](mailto:rohjans@offis.de)

[www.offis.de/energie](http://www.offis.de/energie)



# Referenzen 1

- [Bao5] J. Banks, J. Carson, and B. L. Nelson, Discrete-event system simulation, 4th ed. Prentice Hall International, 2005.
- [Boo5] C. A. Boer, "Distributed Simulation in Industry," Erasmus University Rotterdam, 2005.
- [Bu09] H.-J. Bungartz, "Modellbildung und Simulation: Eine Anwendungsorientierte Einführung". 2009 , Springer.
- [DS07] "dSPACE und das V-Modell für Steuergeräte- Entwicklung," dSPACE. [http://www.fh-fulda.de/fileadmin/Fachbereich\\_ET/Schaukasten/Schaukasten\\_2007/ET-Seminar/Dateien/ET-Seminar2007\\_dSPACE.pdf](http://www.fh-fulda.de/fileadmin/Fachbereich_ET/Schaukasten/Schaukasten_2007/ET-Seminar/Dateien/ET-Seminar2007_dSPACE.pdf)
- [GO07] J. D. Gehrke and C. Ober-Blöbaum, "Multiagent-based Logistics Simulation with PlaSMA," in *Informatik 2007 - Informatik trifft Logistik, Band 1. Beiträge der 37. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik*, 2007, pp. 416–419.
- [LMLD 11] W. Li, A. Monti, M. Luo, and R. Dougal, "VPNET: A co-simulation framework for analyzing communication channel effects on power systems," in *2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, 2011, pp. 143–149.
- [PFR09] M. Pipattanasomporn, H. Feroze, and S. Rahman, "Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation," *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, pp. 1–8, Mar. 2009.
- [Rao1] H.-J. Rabe, "Entwicklung, Simulation und Test mechatronischer Regelsysteme mit modernen HW und SW Werkzeugen," *Simulation*. Paderborn, 2001. [http://www.imtek.de/avt/content/upload/imtek\\_dspace\\_rabe.pdf](http://www.imtek.de/avt/content/upload/imtek_dspace_rabe.pdf)
- [SBP07] R. Soma, A. Bakshi, and V. K. Prasanna, "A Semantic Framework for Integrated Asset Management in Smart Oilfields," *Seventh IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid (CCGrid '07)*, pp. 119–126, May 2007.
- [Too6] M. Törngren, D. Henriksson, O. Redell, C. Kirsch, J. El-khoury, D. Simon, Y. Sorel, H. Zdenek, and K. Årzén, "Co-design of Control Systems and their real-time implementation - A Tool Survey by," Stockholm, 2006.
- [VVo6] A. Verbraeck and H. P. M. Veeke, "Distributed Simulation of Complex Systems : Application in Container Handling," in *Proceedings of the 2002 SISO European Simulation Interoperability Workshop*, 2002.
- [WGA10] L. A. Wehinger, M. D. Galus, and G. Andersson, "Agent-Based Simulator for the German Electricity Wholesale Market Including Wind Power Generation and Widescale PHEV Adoption," *Energy*, 2010.

# Referenzen 2

- [DCo3] "Chrysler and the digital factory", [www.allpar.com/history/digital.html](http://www.allpar.com/history/digital.html)
- [Pa07] E. H. Page, "Theory and Practice for Simulation Interconnection: Interoperability and Composability in Defense Simulation," in *Handbook of Dynamic System Modeling*, P. A. Fishwick, Ed. Chapman & Hall, 2007.
- [Go10] T. Godfrey, S. Mullen, R. C. Dugan, C. Rodine, D. W. Griffith, and N. Golmie, "Modeling Smart Grid Applications with Co-Simulation," in *The 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 2010, pp. 291–296.
- [LSW10] C. Lewandowski, J. Schmutzler, and C. Wietfeld, "A Simulation Environment for Electric Vehicle Charging Infrastructures and Load Coordination," in *GI Jahrestagung (1)*, 2010, pp. 479–484.
- [De10] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses, and M. A. S. Masoum, "Voltage Profile and THD Distortion of Residential Network with High Penetration of Plug-in Electrical Vehicles," *System*, no. 4, pp. 1–6, 2010.
- [Ra11] S. D. Ramchurn, P. Vytelingum, A. Rogers, and N. Jennings, "Agent-Based Control for Decentralised Demand Side Management in the Smart Grid," pp. 5–12, 2011.
- [Ko12] K. Kok, B. Roossien, P. Macdougall, and O. Van Pruissen, "Dynamic Pricing by Scalable Energy Management Systems - Field Experiences and Simulation Results using PowerMatcher," no. July. 2012.
- [Kuo8] F. Kupzog, "Frequency-responsive load management in electric power grids," Vienna University of Technology, 2008.
- [Be10] J. Bergmann, C. Glomb, J. Götz, J. Heuer, R. Kuntschke, and M. Winter, "Scalability of Smart Grid Protocols," in *First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2010, pp. 131–136.
- [Hoo6] K. Hopkinson, X. Wang, R. Giovanini, J. Thorp, L. Fellow, K. Birman, and D. Coury, "EPOCHS : A Platform for Agent-Based Electric Power and Communication Simulation Built From Commercial Off-the-Shelf Components," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 548–558, 2006.
- [SK97] J. Sztipanovits and G. Karsai, "Model-Integrated Computing," *Computer*, vol. 30, no. 4, pp. 110–111, 1997.