



**MAREN**  
Multiagentenkoordinierte Regelung  
von Energiesystemen

# Lösungen für die Herausforderungen im Verteilnetz der Zukunft

Vorstellung der Projektergebnisse BAG-Energie -

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Forschungsprojekt MASimBa

STAND: 01.07.2017

**MASimBa**



# Agenda

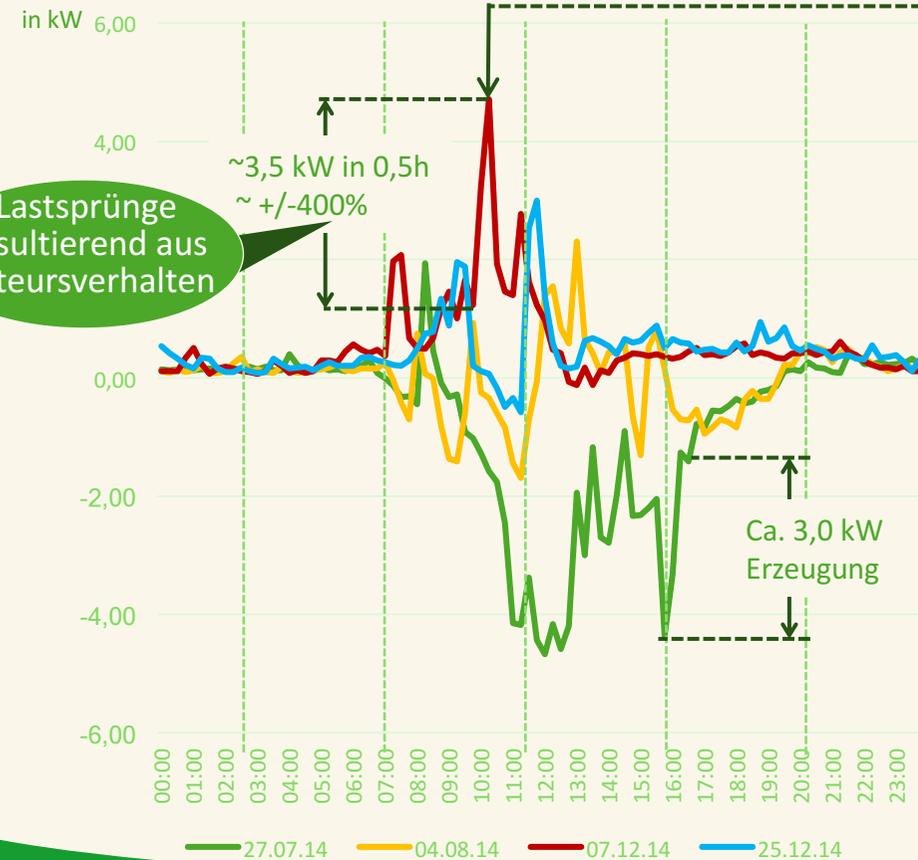
- a. **Problemstellung & Ziele des Projekts**
- b. **Modell- & Implementierungsarchitektur**
  - Ebenenmodell
  - Implementierung (Systemarchitektur, Agenten Umsetzung, Framework)
- c. **Proof-of-Concept netzsensitive Gerätesteuerung**
  - Physikalische Simulation
  - Netzsensitive Regelung („iMOD“)
- d. **Simulationsläufe Ergebnisse**
- e. **Optimierung (Projektpartner IBG)**



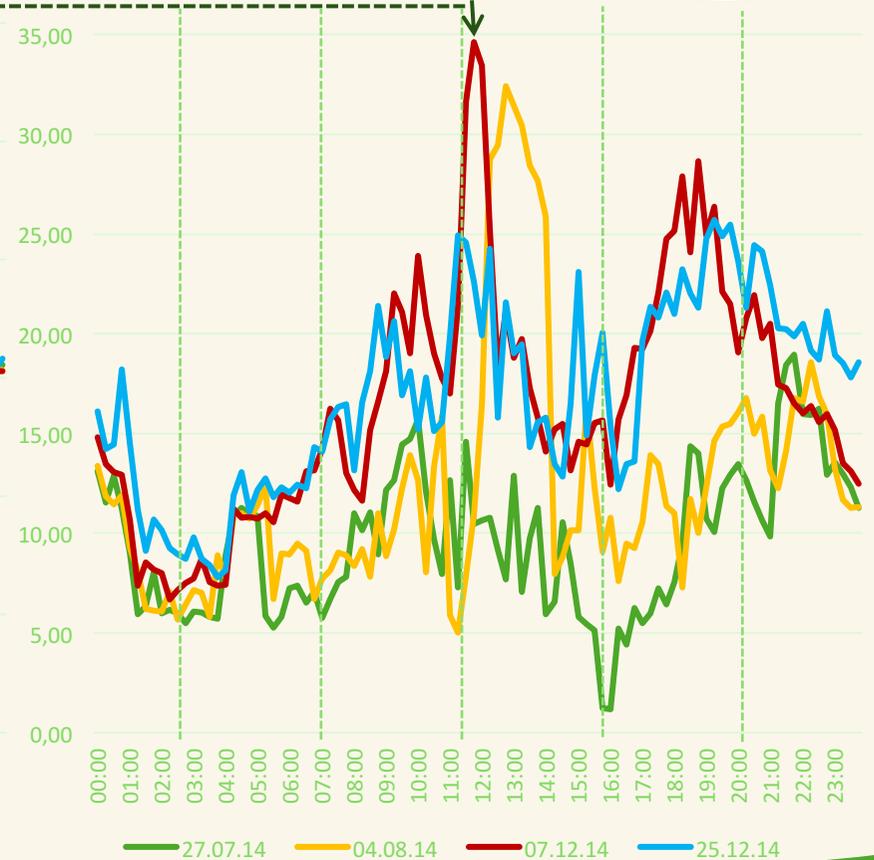
# Extreme Lastschwankungen für einen einzelnen Haushalt an Einzeltagen korrespondieren nicht mit der Netzlast

Last eines Haushalts mit Photovoltaik - Ausgewählte reale Tagesverläufe in kW während einer Viertelstunde

Last HH

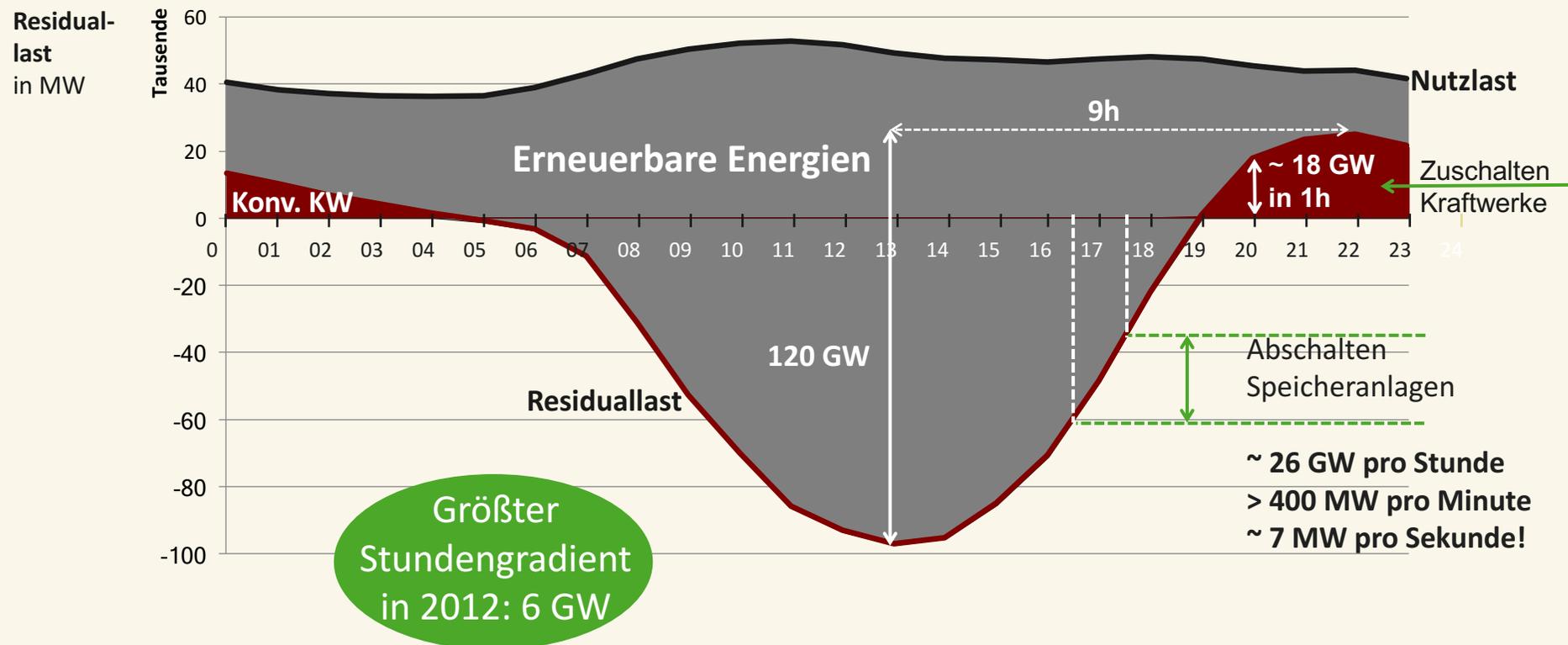


Last am Trafo



Gesamtlast im Netz im Vergleich dazu sehr gleichmäßig.  
Dennoch müssen zukünftig jeden Tag extreme Last- und  
Einspeisungsgradienten präzise gesteuert werden.

Lastverlauf am „9.Juni 2050“\*



\*Basisjahr für Hochrechnung Realdaten aus 2012

# Smart-Meter basierte Steuerung ist schlicht eine ungeeignete Technologie für die angestrebte Steuerungsaufgaben

Kriterien	Smart Meter basierte zentrale Steuerung	
Kosten	Kostenintensiv: Anschaffung (7 Mrd.€/a), Betrieb(6,7 Mrd.€/a), (zentrale) Steuerungseinheiten und Kommunikationseinrichtungen in Summe teurer + Invest& Betrieb der Regelstrecke nach dem SMG	👎
Eigenstromverbrauch	Höher als Haushalts-Einsparungspotential. Benötigte Energiegrundlast für Steuerung konterkariert volatile EE.	👎
Datenschutz	Externe Akkumulation persönlicher Daten. Schutz vor Zweckentfremdung in der IT nicht zu gewährleisten	👎
Komplexität Steuerung	Zentrale Steuerung von > 100 Millionen Aggregaten unrealistisch Komplexität für Optimierung prohibitiv hoch	👎
Kommunikationslast	Hohe Gleichzeitigkeit der Steueraufgabe erzeugt Spitzenlasten in Kommunikationsnetzen Mögliche Überlastung der Kommunikations-Netze bei „Netzkrise“	👎
Lokale Stromnetz-limitationen	Jede Netzschleife mit individueller, spezifischer Situation, => Komplexitäts-, Kommunikationslast- und Geschwindigkeits-Problem für zentrale Steuerungen in jeder Netzschleife einzeln zu lösen	👎
Kommunikations-verfügbarkeit	Keine Steuerung bei Kommunikationsausfall Verfügbarkeit realer Kommunikationssysteme nur bei 97-98%	👎
Resilienz & Robustheit	Keine: Aufbau der Direktsteuerung zu Millionen von Aggregaten erzeugt unzählige neue Angriffsvektoren und prohibitiven Pflegeaufwand	👎

**Lokale Selbststeuerung der Aggregate zwingend erforderlich**

# Wie könnte eine lokale Selbststeuerung funktionieren und wie weist man das nach?

## Wie funktioniert es?

Ein Gerät muss lokal relevante Netzparameter selbst erfassen, d.h. messen können und sein eigenes elektrisches Verhalten an den Erkenntnissen aus der Messung ausrichten und adaptieren

## Wie weist man es nach?

**Schritt 1:** In einer Simulation müssen solche aktiven lokale Geräte nachgebildet werden und es müssen Algorithmen entwickelt werden, wie die Geräte auf die Messungen reagieren sollen.

**Schritt 2:** In Simulationsläufen auf Basis realer Netz- und Verbrauchsdaten muss nachgewiesen werden, dass die Geräte Ihre primäre Aufgabe erfüllen und gleichzeitig das Netz stabiler bleibt als im Vergleichsfall, wenn sie ungesteuert agieren würden

**Schritt 3:** Extremszenarien sind zu definieren und auszutesten, ob das Verhalten zuverlässig ist

**Schritt 4:** Implementierung in Hardware und Test in realen physikalischen Netzen

## Entwicklung der Selbstregelung erfordert zwingend geeignete Tools

Konventionelle Netzsimulationen sind auf statische Netze gerichtet in denen (Extremwert-)Szenarien gerechnet werden.

### Es mangelt an Tools, die:

- Dezentral orientierte Regelalgorithmen auf Geräteebene abbilden
- Dynamisch veränderbare Netzstrukturen zulassen
- Das Verhalten der Akteure einbinden
- Physikalische Effekte mit Verhaltens-effekten kombinieren
- Kommerzielle Auswirkungen für Beteiligte darstellen
- Resultierende Summeneffekte aus Einzelverhalten emergent ermitteln\*
- ...



### Tools benötigen dafür u.a. folgendes:

- Architektur, die diese Anforderungen abbildet und transparent macht
- Solver, die in einem Agentensystem funktionieren
- Holonenbildung zur Kapselung bei Modellierung und Rechnung
- Emergente Bezugsoptimierung durch Kunden mit Batterie,
- Emergente Kaufentscheidungen für/gegen PV, EVs\*\* etc. => Wachstum der EVs in einem Ort,
- Abbildung potenzieller Effekte durch Vergrämen von Kunden,
- ...

\* Zum Beispiel den „Markt“

\*\*EV=Electric Vehicle

# Ziele des Projekts MASimBA

1

**Proof-Of-Concept:** Nachweis der Stabilität einer netzsensitiven Regelung auf Verteilnetzebene

2

**Physikalische Simulation:** Die physikalische Simulation mit einem Agentensystem ist implementiert und erzielt eine für die praktische Anwendung akzeptable Genauigkeit; Konzept eines leistungsfähigen Solvers

3

**Architektur:** Eine Softwarearchitektur der Agentensimulation ist definiert und in Grundzügen implementiert; Ausblick auf Optimierung und weitere Nutzungsszenarien

# Agenda 1. Ergebnisse

- |    |   |    |
|----|---|----|
| a. | <b>Problemstellung &amp; Ziele des Projekts</b>   | SW |
| b. | <b>Modell- &amp; Implementierungsarchitektur</b>  |    |
|    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ebenenmodell</li> </ul>  | SW |
|    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementierung (Systemarchitektur, Agenten Umsetzung, Framework)</li> </ul> | SK |
| c. | <b>Proof-of-Concept netzsensitive Gerätesteuerung</b>   |    |
|    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Physikalische Simulation</li> </ul>  | PG |
|    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Netzsensitive Regelung („iMOD“)</li> </ul>                                   |    |
| d. | <b>Simulationsläufe Ergebnisse</b>  | SW |
| e. | <b>Optimierung (Projektpartner IBG)</b>   | PG |

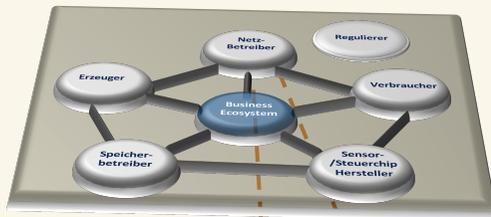
# Ebenenmodell

- Ermöglicht eine transparente, physikalisch korrekte Kopplung unterschiedlicher Infrastrukturen (Sektorkopplung)
- Ermöglicht die transparente Integration von psychologischen Einflüssen wie Kundenzufriedenheit und Entscheidungsprozessen
- Ermöglicht die Abbildung beliebiger Geschäftsmodelle unter Berücksichtigung physikalischer Restriktionen
- Ermöglicht die Analyse von sich im Zeitablauf verändernden Strukturen

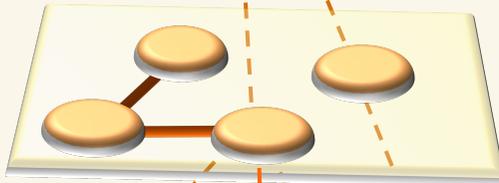
# MASIMBA Architektur

## Ebenen und Schichten

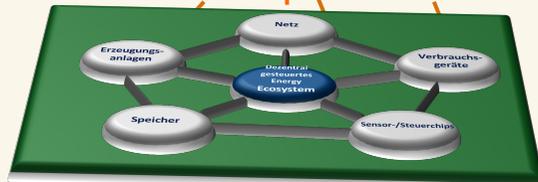
### Akteurs-Ebene



### Virtuelle Ebene



### Physikalische Ebene



### Organisationen als Akteursgruppen/-rollen z.B.

- Erzeuger/Anlagenbetreiber
- Netzbetreiber
- Haushalte
- Händler
- Virtuelle Kraftwerksbetreiber

### Handelnden Personen z.B.:

- Mitarbeiter/Management
- Mitglieder eines Haushalts

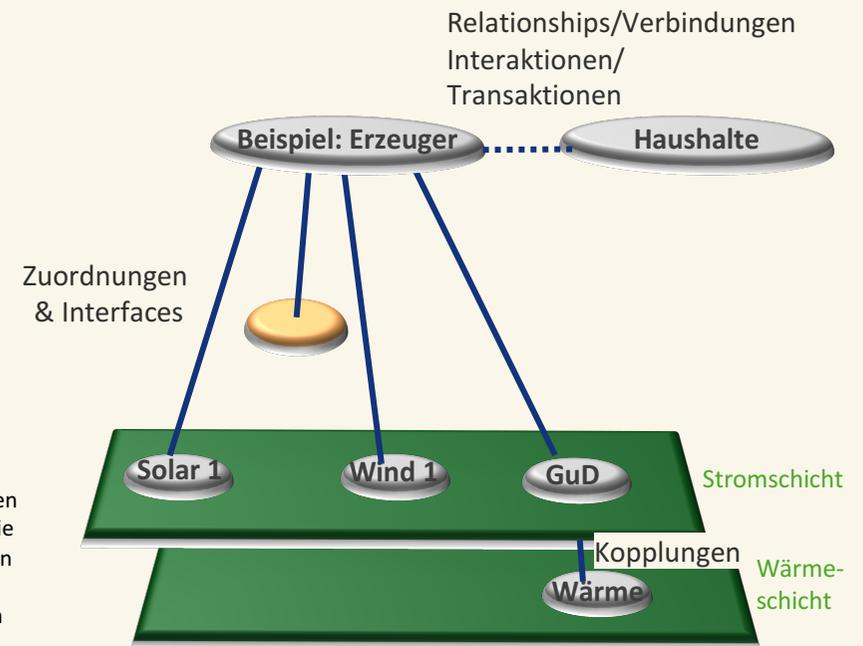
### Daten und deren Verarbeitung:

- Datensammlungen (z.B. Giralgeld)
- Software
- Entscheidungslogiken (SW)

### Reale Objekte:

- Physikalische Objekte, deren Produktion, deren Transport (Straße, Schiene, Wasser, Luft) sowie deren geographische Lage (evt. Unterteilung in mobile Objekte und Immobilien)
- Energieträger mit spezifischen Leitungsnetzen (Strom, Wärme, Erdöl, Methan, Wasserstoff)
- Physikalische Kommunikation & Datenverarbeitung
- Wasser
- Wetter/Klima (inkl. lokalen Energieverhältnissen)

## Schnittstellen

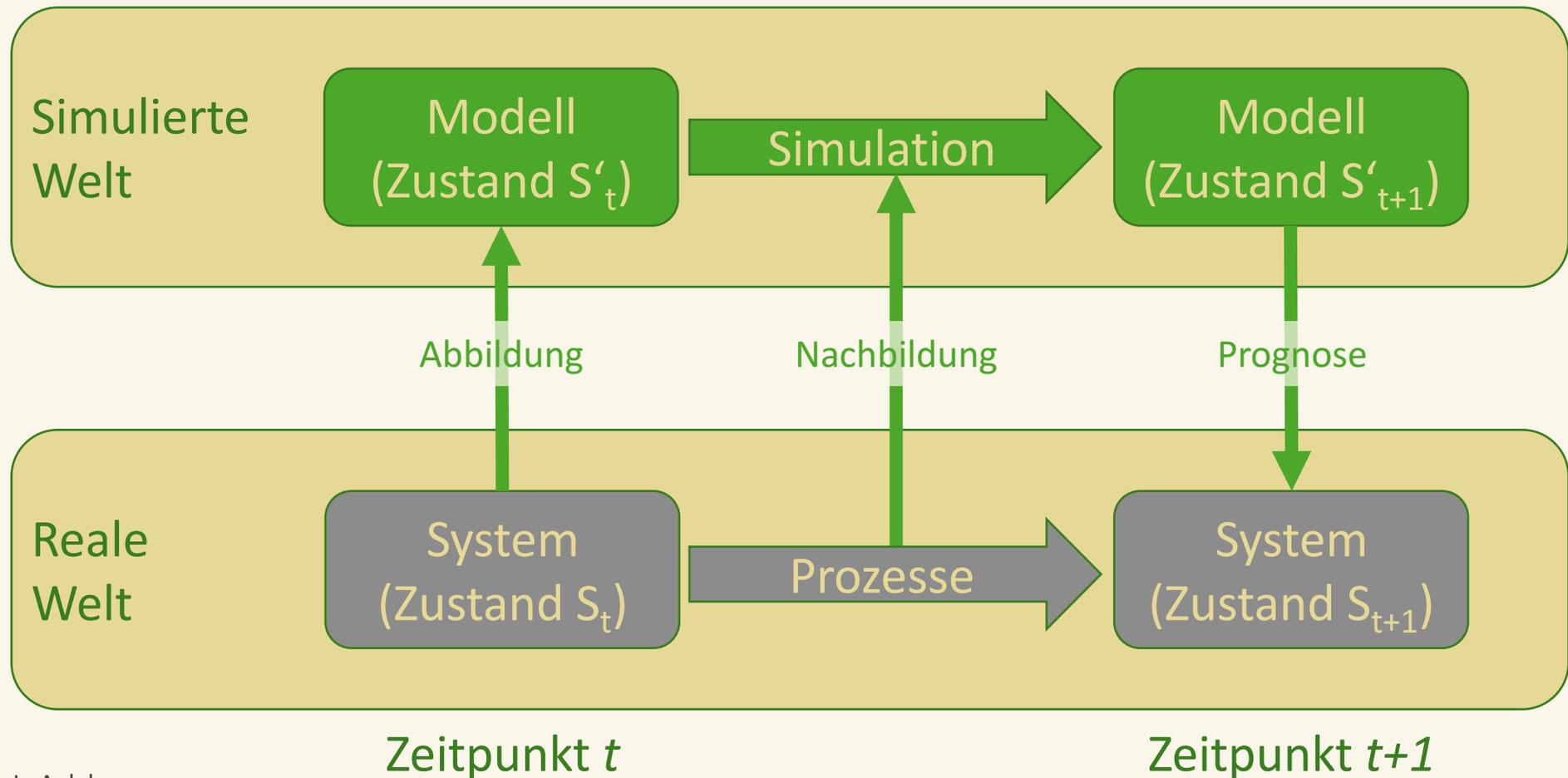


Quelle: Theron, JSW

# Agenda 1. Ergebnisse

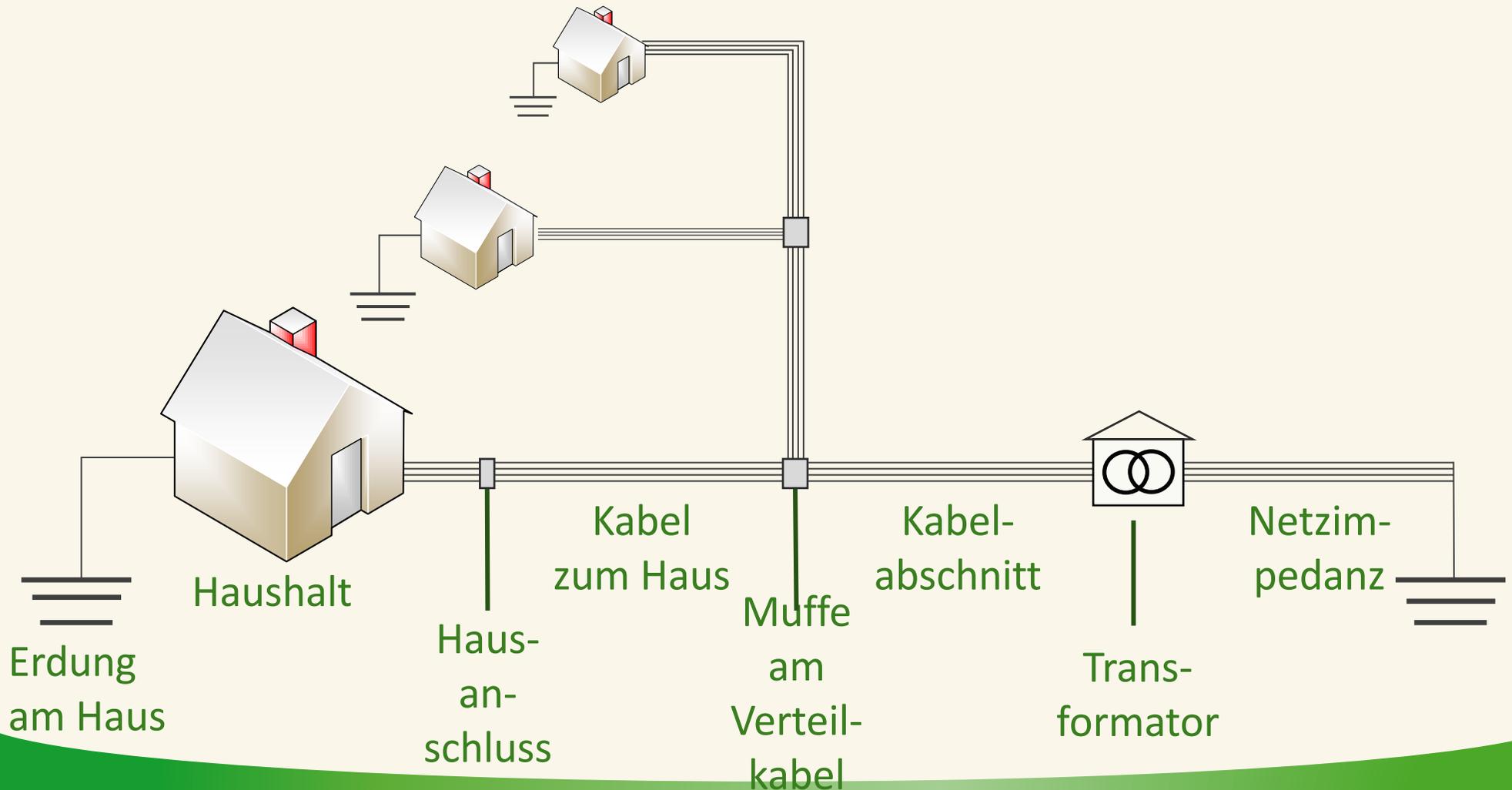
- a. **Problemstellung & Ziele des Projekts** SW
- b. **Modell- & Implementierungsarchitektur**
  - Ebenenmodell SW
  - Implementierung (Systemarchitektur, Agenten Umsetzung, Framework) SK
- c. **Proof-of-Concept netzsensitive Gerätesteuerung**
  - Physikalische Simulation PG
  - Netzsensitive Regelung („iMOD“)
- d. **Simulationsläufe Ergebnisse** SW
- e. **Optimierung (Projektpartner IBG)** PG

# Grundidee der Simulation



In Anlehnung an  
 MILLER, John H.; PAGE, Scott E.: *Complex Adaptive Systems: An introduction to computational models of social life*. Princeton and N.J :  
 Princeton University Press, 2007

# Exemplarische Modellierung eines elektrischen Netzes



# Elemente eines Simulationselements AgentNetwork



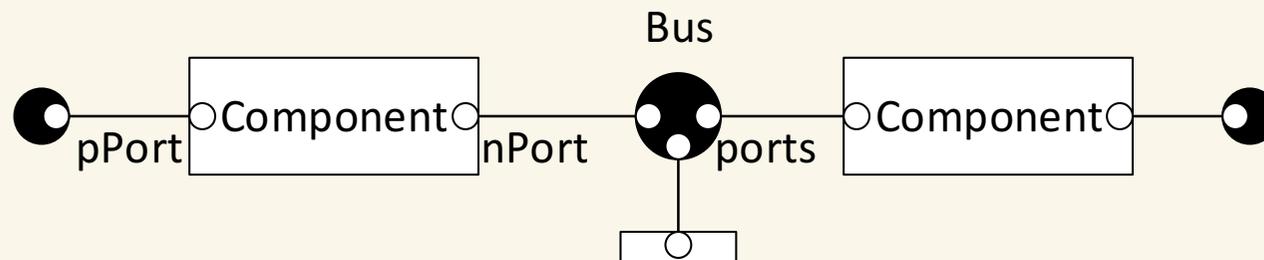
- Ein **Bus** verbindet mindestens zwei Komponenten
- Die Verbindungen sind durch Aggregation von Ports (ports) definiert



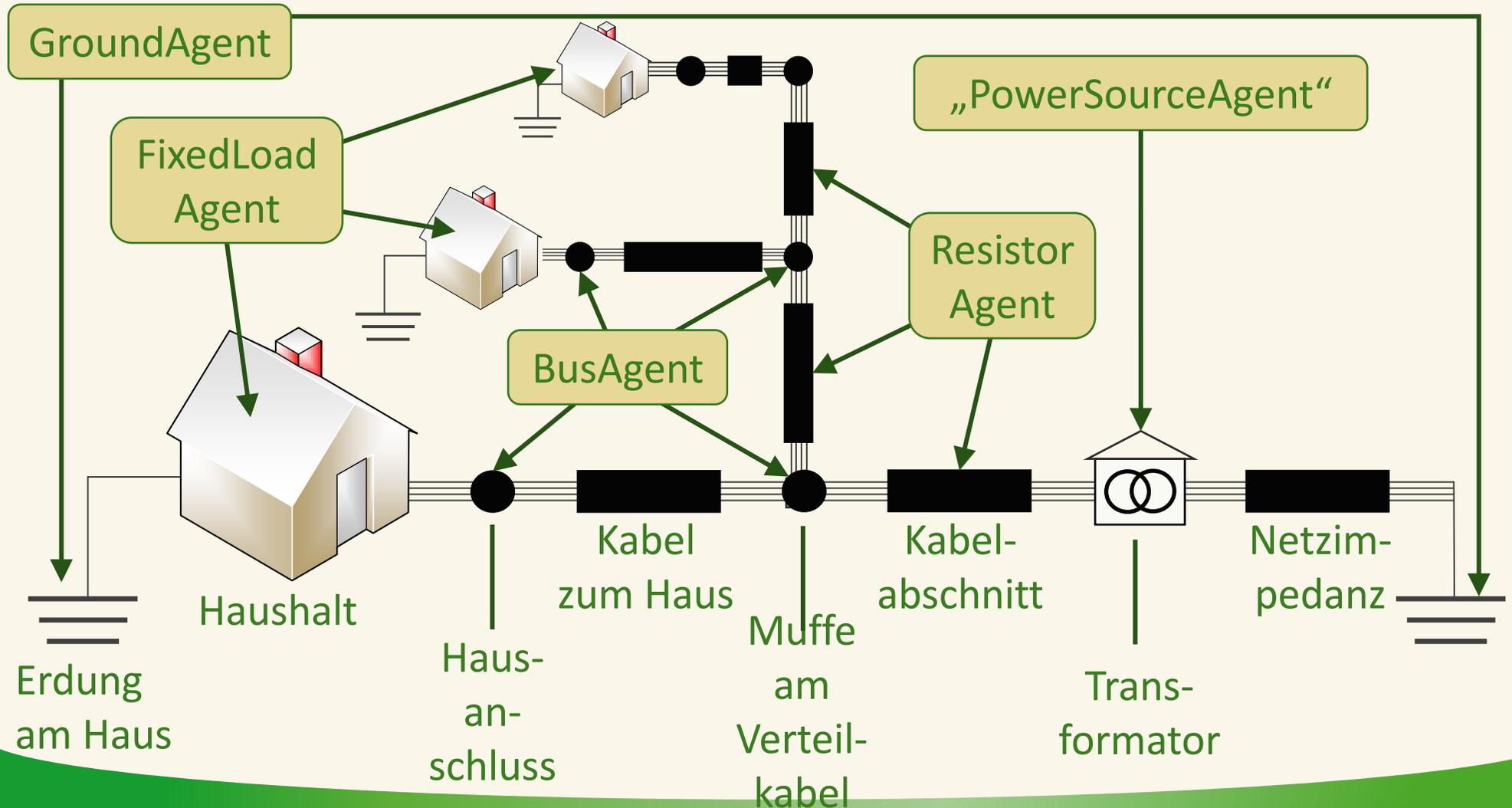
- Ein **Port** bildet den Anschlusspunkt eines Netzelementes



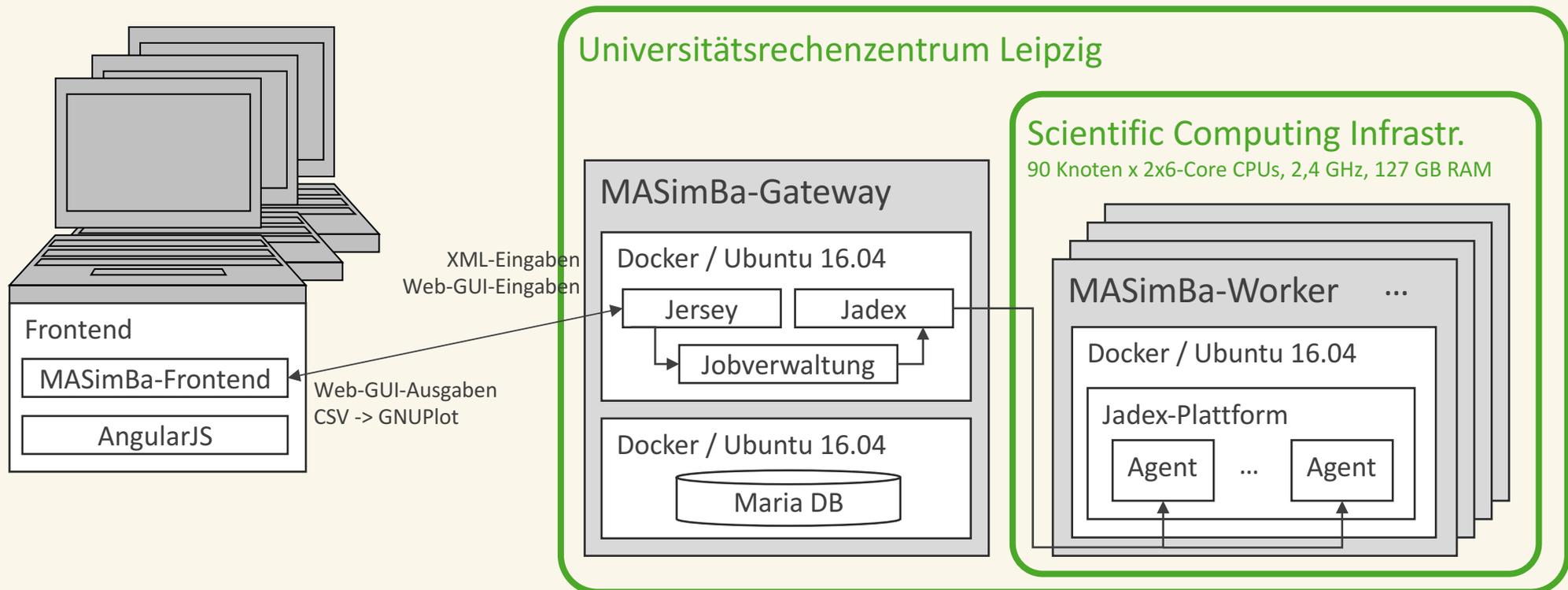
- Eine **Component** ist eine elektrische Komponente.
- Sie besitzt genau 2 Nachbar-Bus-Elemente, welche durch **nPort** und **pPort** verbunden sind.



# Exemplarische Modellierung eines elektrischen Netzes



# Deployment und verteilte Ausführung der Simulation



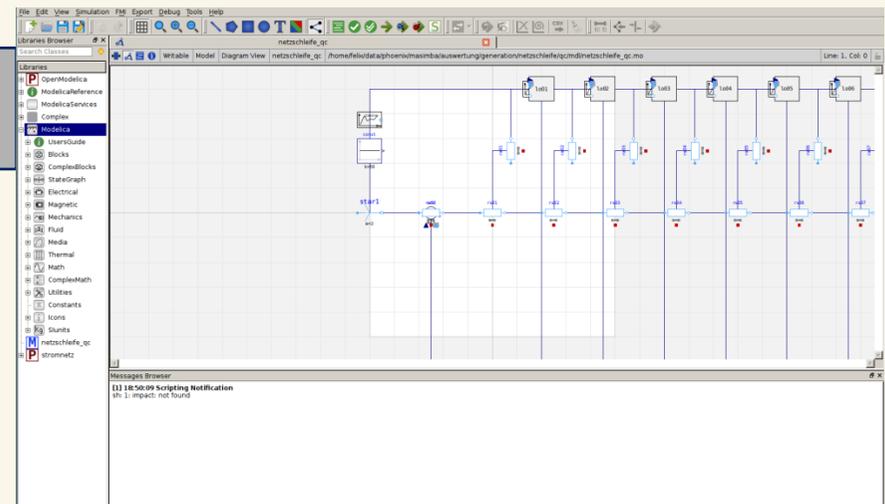
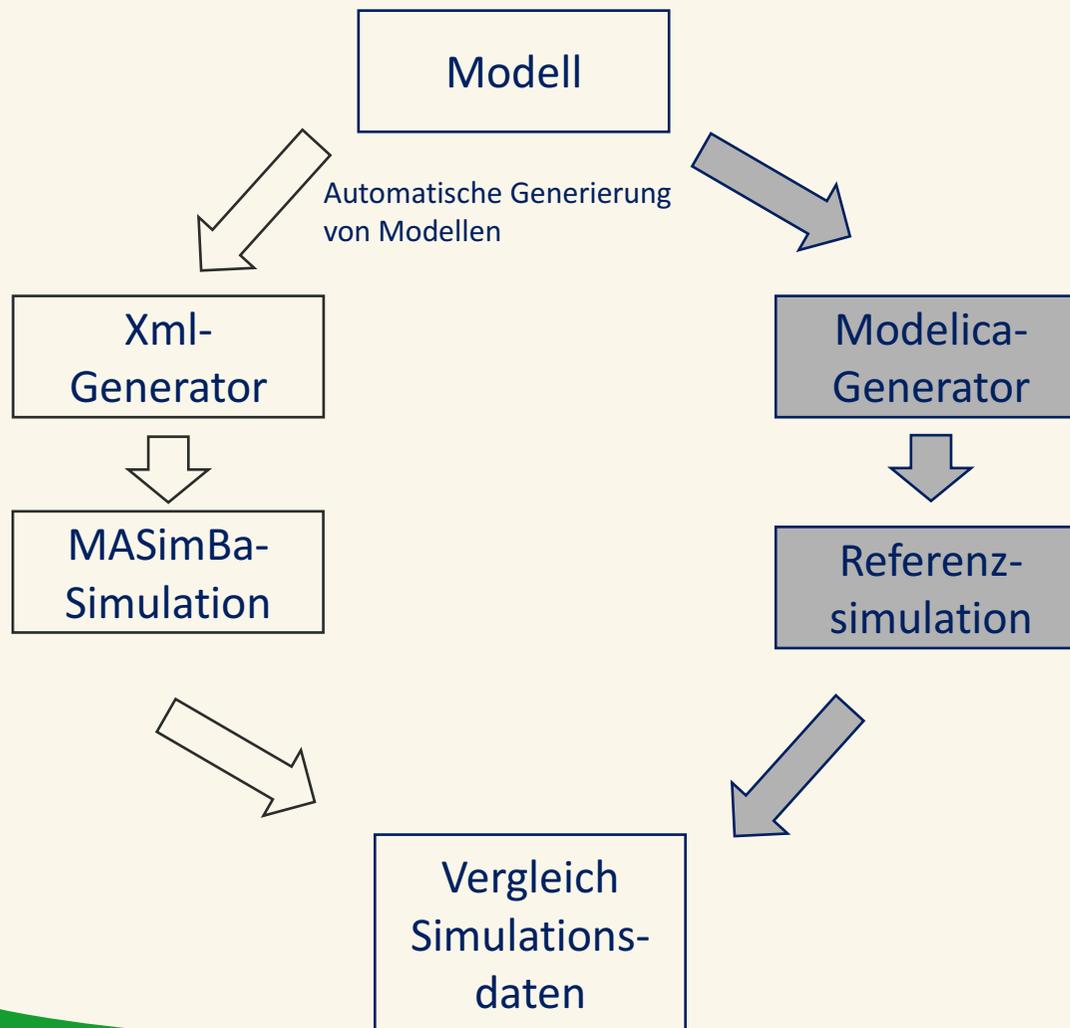
Jadex-Plattform unterstützt verteilte Ausführung und Kommunikation zwischen Agenten. Docker-Swarm ermöglicht verteiltes Starten beliebig vieler Container. Kommunikation zwischen Docker-Containern innerhalb eines Swarms erfolgt über ein Virtuelles Overlay-Netzwerk. Ermöglicht Kommunikation zwischen Jadex-Plattformen und damit zwischen Agenten. Kommunikation mit Datenbank wird ermöglicht.



# Agenda 1. Ergebnisse

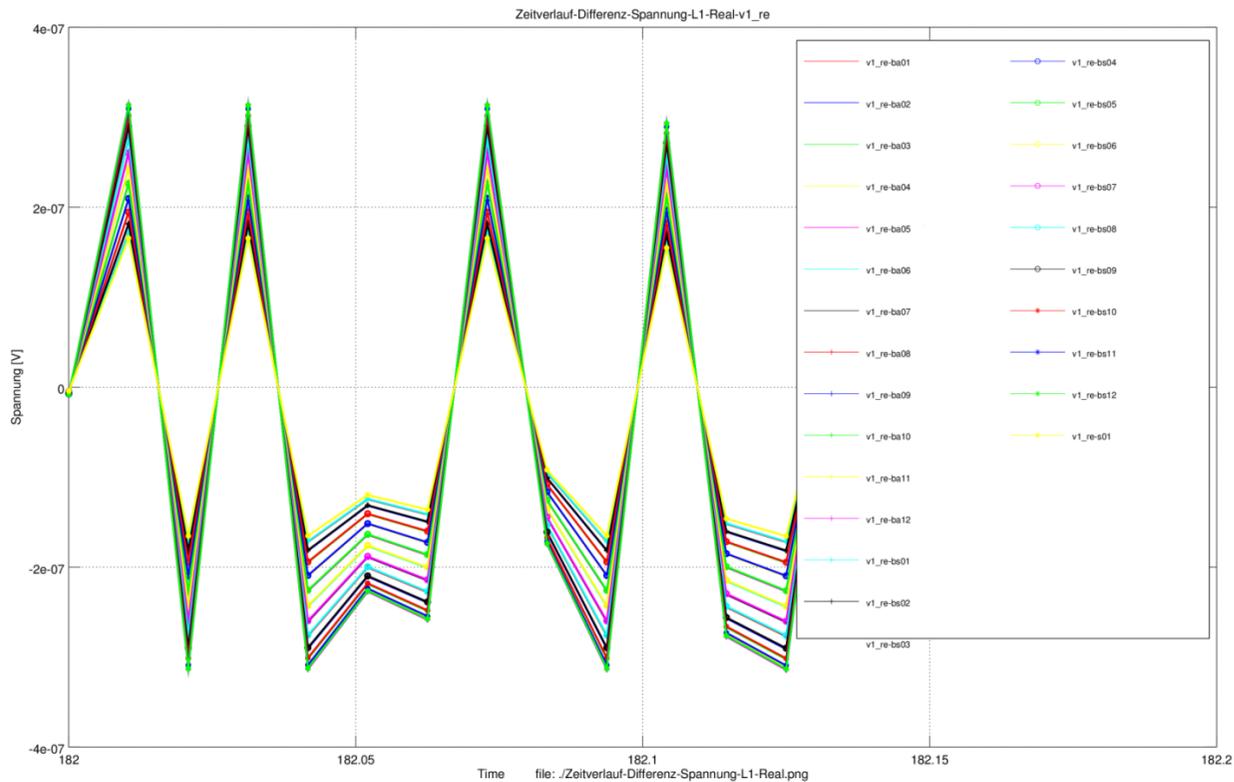
- a. **Problemstellung & Ziele des Projekts** SW
- b. **Modell- & Implementierungsarchitektur**
  - Ebenenmodell SW
  - Implementierung (Systemarchitektur, Agenten Umsetzung, Framework) SK
- c. **Proof-of-Concept netzsensitive Gerätesteuerung**
  - Physikalische Simulation PG
  - Netzsensitive Regelung („iMOD“)
- d. **Simulationsläufe Ergebnisse** SW
- e. **Optimierung (Projektpartner IBG)** PG

# Validierung - Simulation - Simulation



# Validierungsergebnis Drehstrom

## Phase1, Realteil, Abbruch bei $10^{-9}$ V



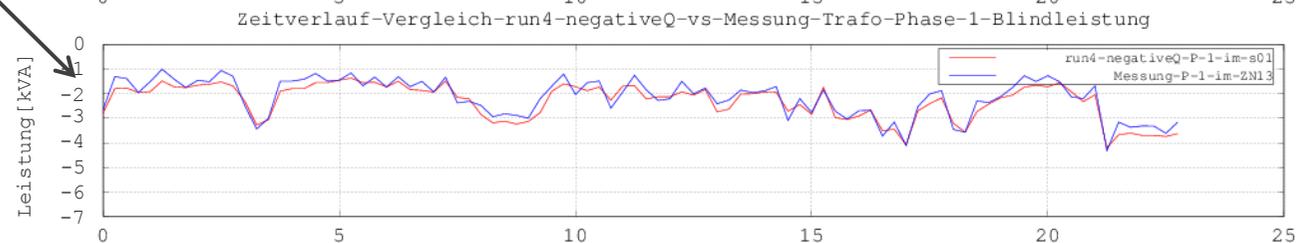
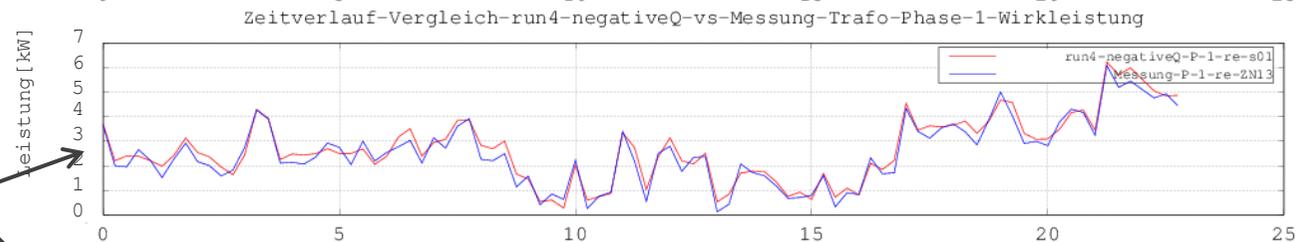
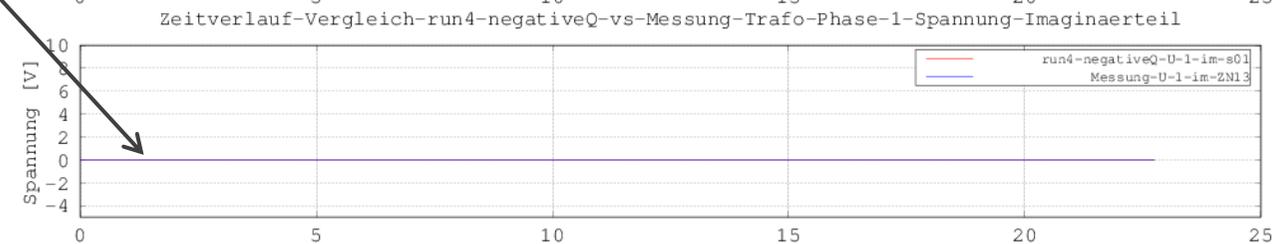
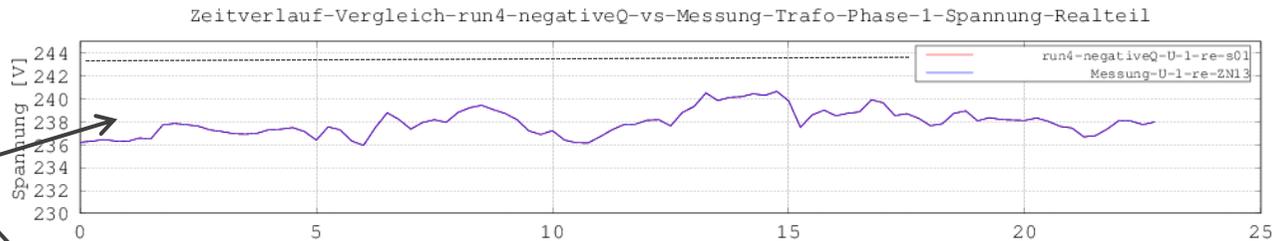
Die Validierung wies Abweichungen kleiner  $10^{-6}$  auf und war damit erfolgreich



# Die Simulation hat den tatsächlichen Lastverlauf zuverlässig nachgebildet

Spannungsvorgabe  
(real/Imaginär)  
an ZN01 bis ZN03

— Simulation  
— Messung



----- +/-0,6\*Abweichung  
nach EN50610

Leistungsvergleich  
(real/Imaginär)  
an ZN01 bis ZN03

— Simulation  
— Messung



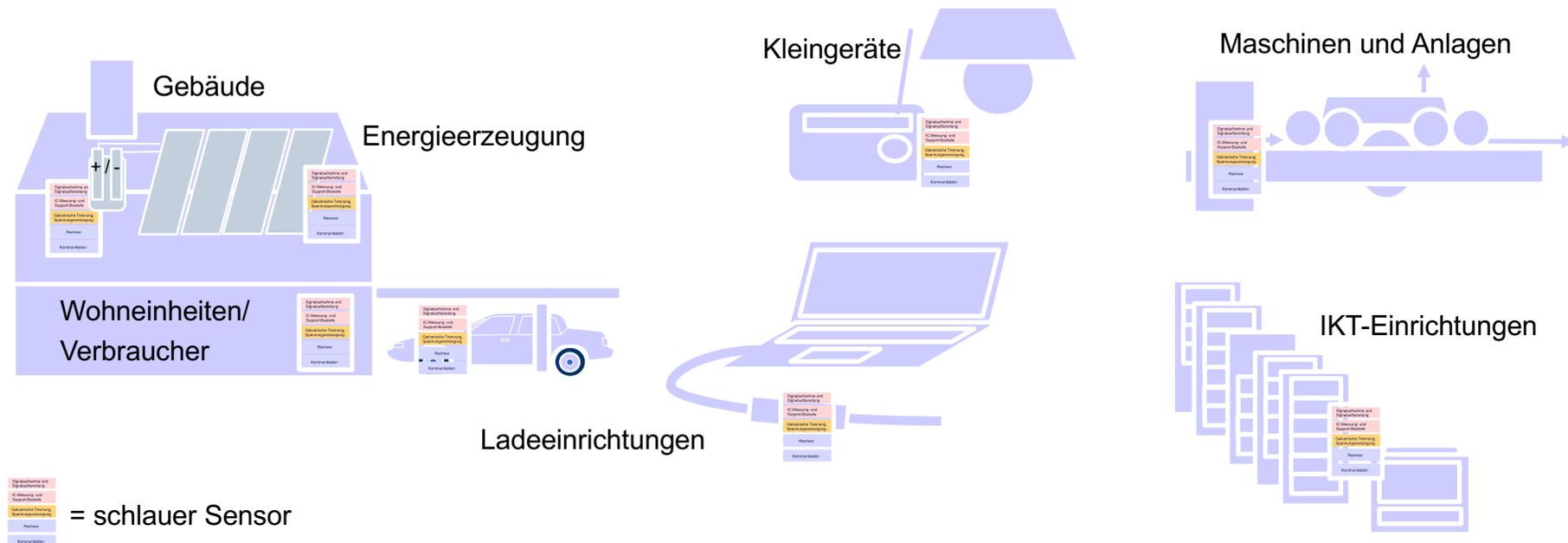
# Agenda 1. Ergebnisse

- a. **Problemstellung & Ziele des Projekts** SW
  
- b. **Modell- & Implementierungsarchitektur**
  - Ebenenmodell SW
  - Implementierung (Systemarchitektur, Agenten Umsetzung, Framework) SK
  
- c. **Proof-of-Concept netzsensitive Gerätesteuerung**
  - Physikalische Simulation PG
  - **Netzsensitive Regelung („iMOD“)** PG
  
- d. **Simulationsläufe Ergebnisse** SW
  
- e. **Optimierung (Projektpartner IBG)** PG

# Die Basis-Idee – intelligente Sensorik als Massenzlösung ermöglicht autonomes netzkonformes Verhalten von allen Geräten

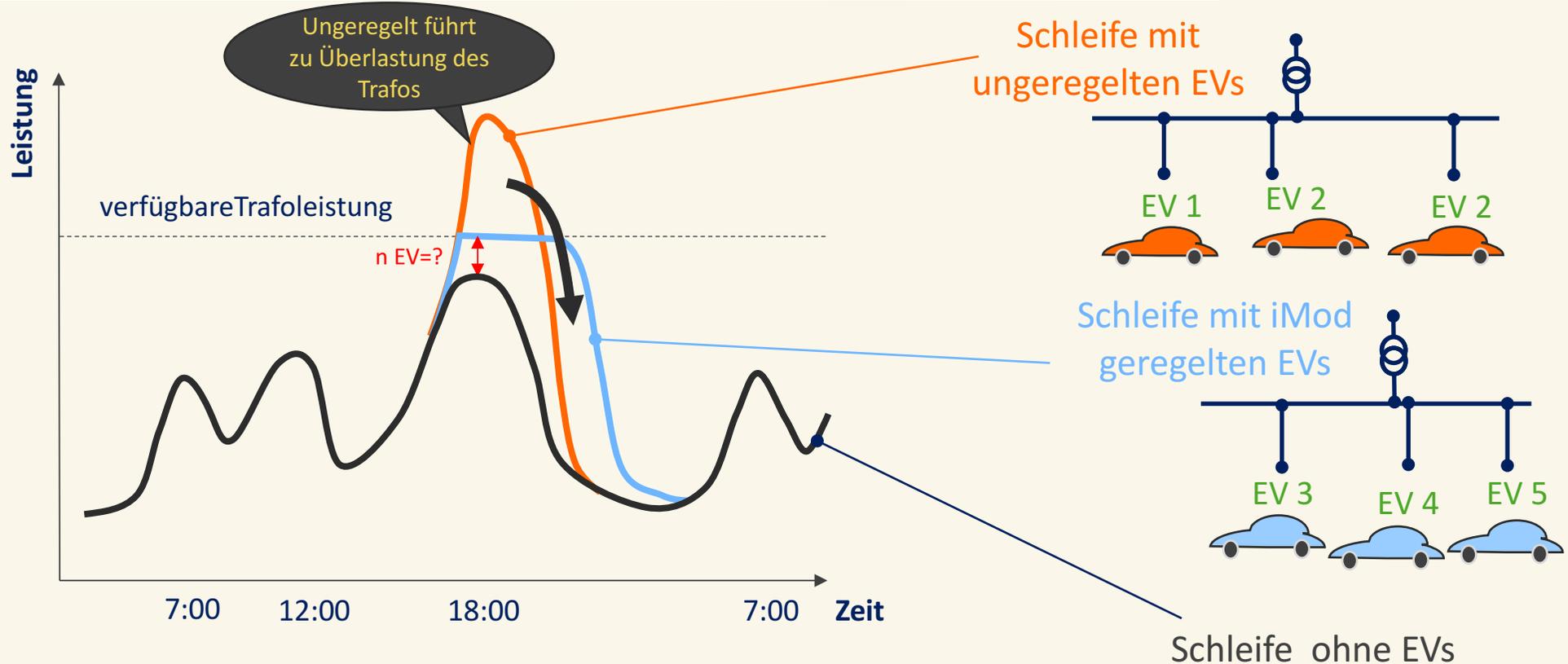
## ZIM Netzwerk MAREN

Eine dezentrale, selbstoptimierende Steuerung ist integraler Bestandteil in (jedem) Gerät / Maschine / ...



.... kennt, beobachtet, analysiert, informiert ...  
 ...und realisiert netzfreundliche, energiesparende, ökonomische, Handlungen  
 abgestimmt auf die Möglichkeiten des spezifischen Geräts.

# Zielszenario : Trafolast durch EVs-mit / ohne iMod\*-Regelung

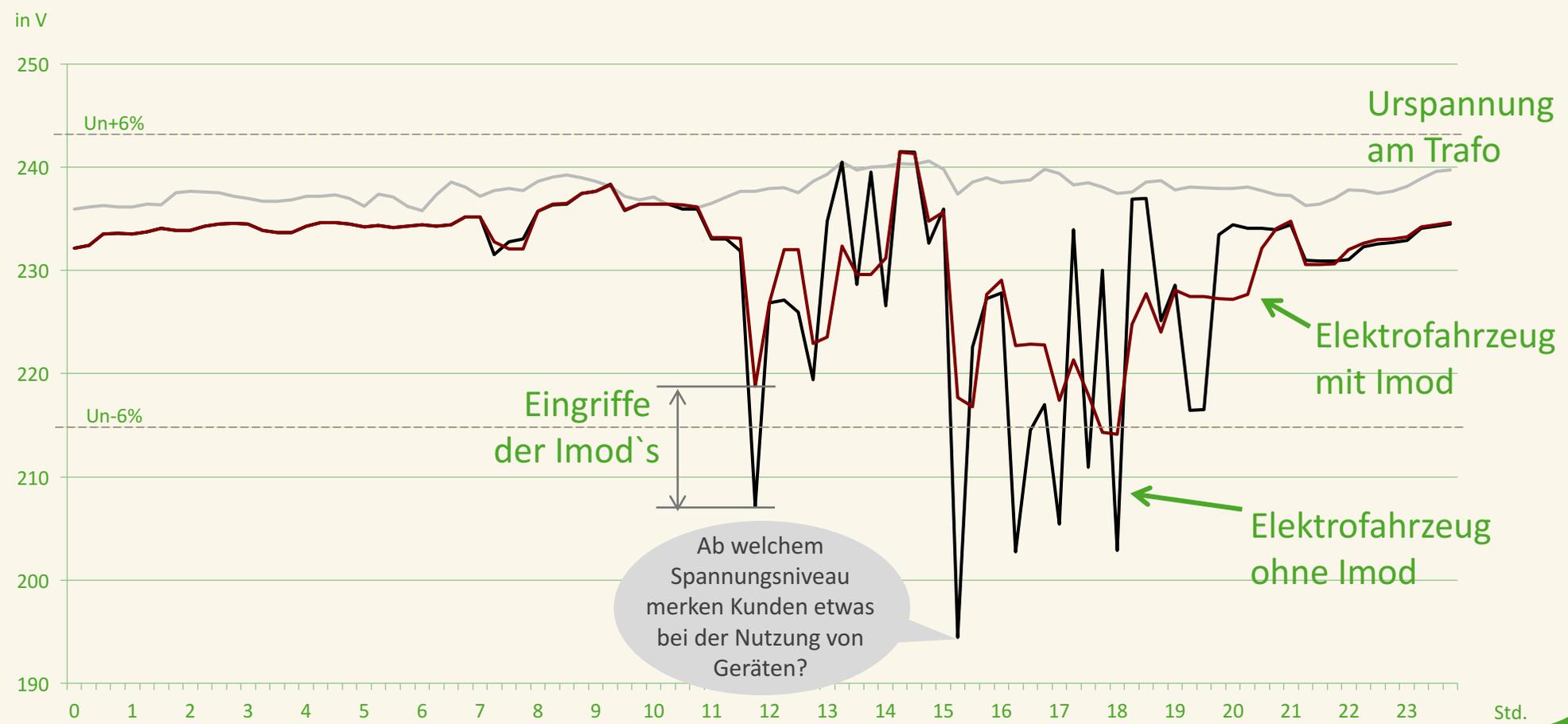


**Die iMod-Regelung soll die Ladeleistung der Elektrofahrzeuge autonom unter der maximalen Netzbelastung halten**

\* Bezeichnung angelehnt an entsprechendes Hardware-Projekt im MAREN Netzwerk

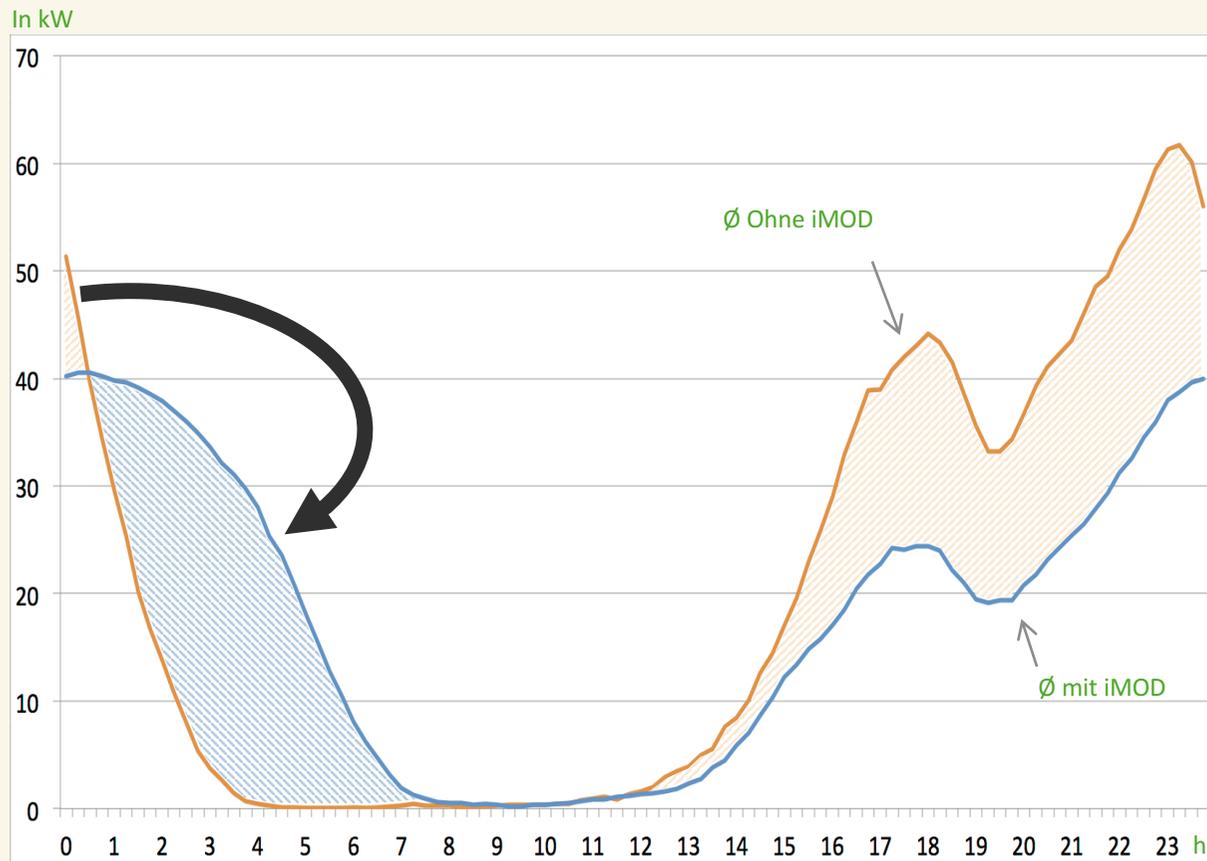
# Der Basis-iMOD begrenzt die Spannungsabfälle

Abgang am Trafo bis zum ersten Abzweig – mit / ohne Imod



# Der iMOD verlagert die vermiedene Ladung in die frühen Morgenstunden

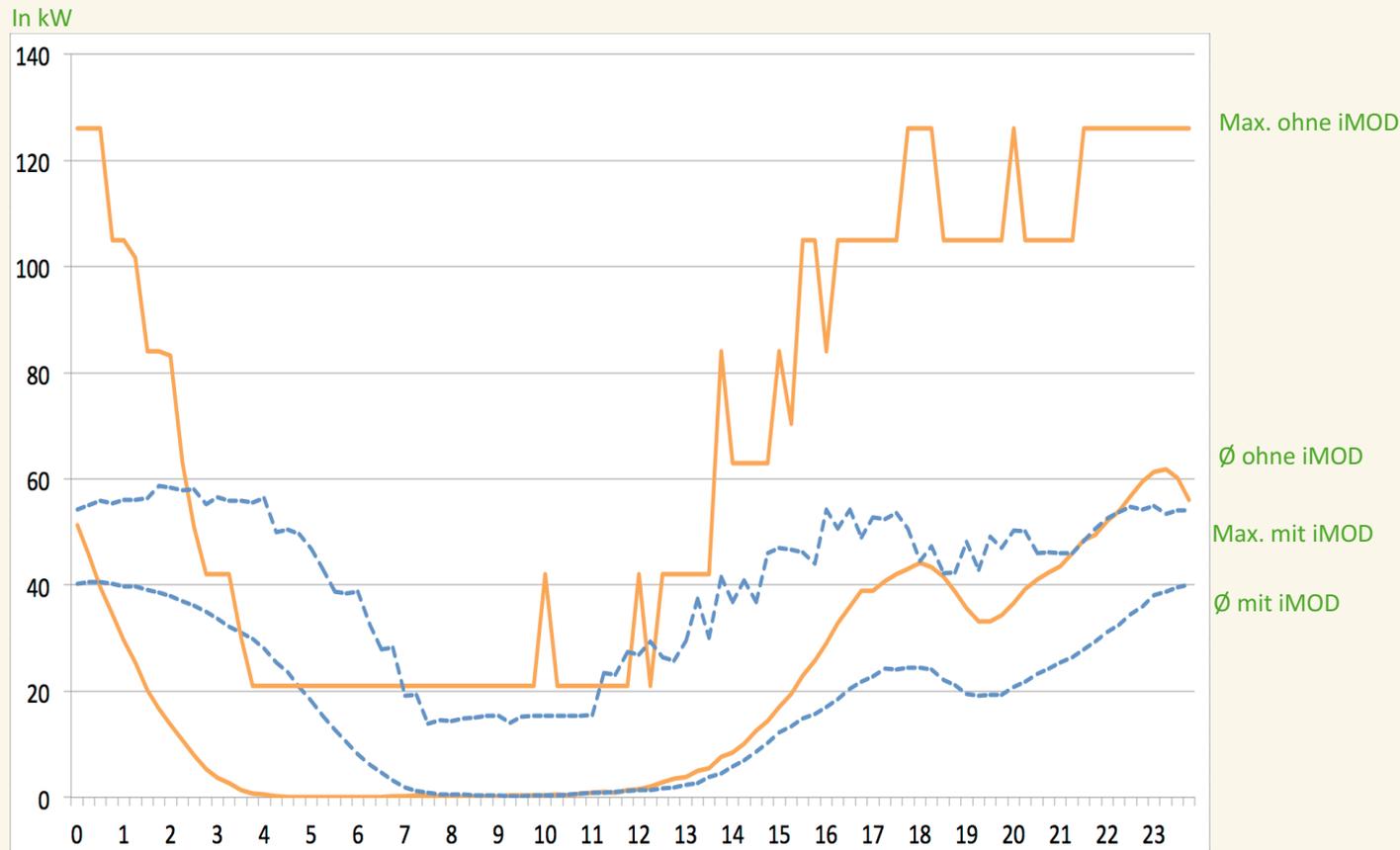
Jahreslauf – PV, EV - Durchschnittliche aggregierte Leistungen der Elektrofahrzeuge für jeden Zeitpunkt eines Jahres - mit und ohne iMOD





# Die Spitzen, die ohne Steuerung auftreten, sind erheblich

Jahreslauf – PV, EV - Aggregierte Leistungen der Elektrofahrzeuge mit und ohne iMOD



# Agenda 1. Ergebnisse

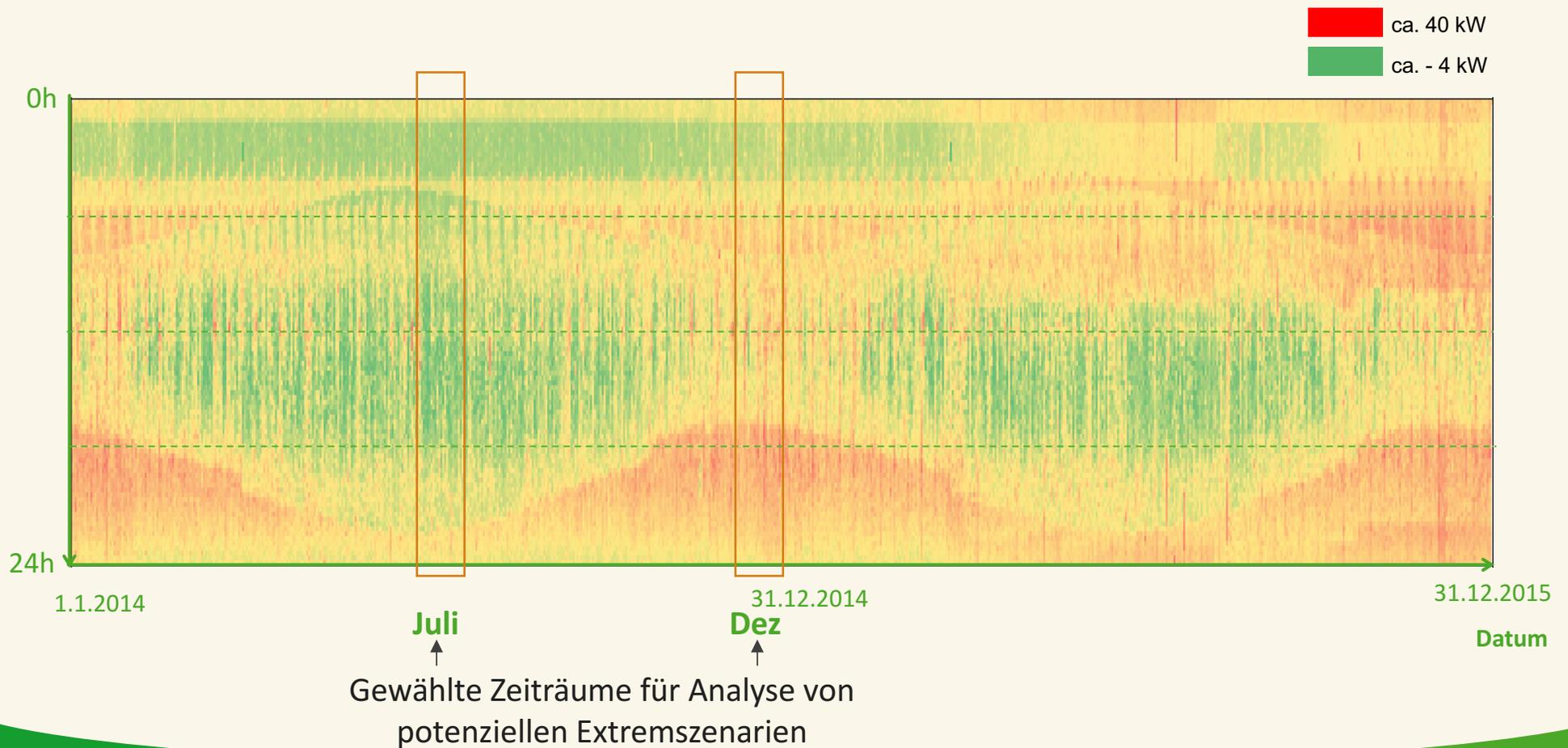
- a. **Problemstellung & Ziele des Projekts** SW
  
- b. **Modell- & Implementierungsarchitektur**
  - Ebenenmodell SW
  - Implementierung (Systemarchitektur, Agenten Umsetzung, Framework) SK
  
- c. **Proof-of-Concept netzsensitive Gerätesteuerung**
  - Physikalische Simulation PG
  - Netzsensitive Regelung („iMOD“) PG
  
- d. **Simulationsläufe Ergebnisse** SW
  
- e. **Optimierung (Projektpartner IBG)** PG

# Die Last in der Netzschleife ist relativ gering

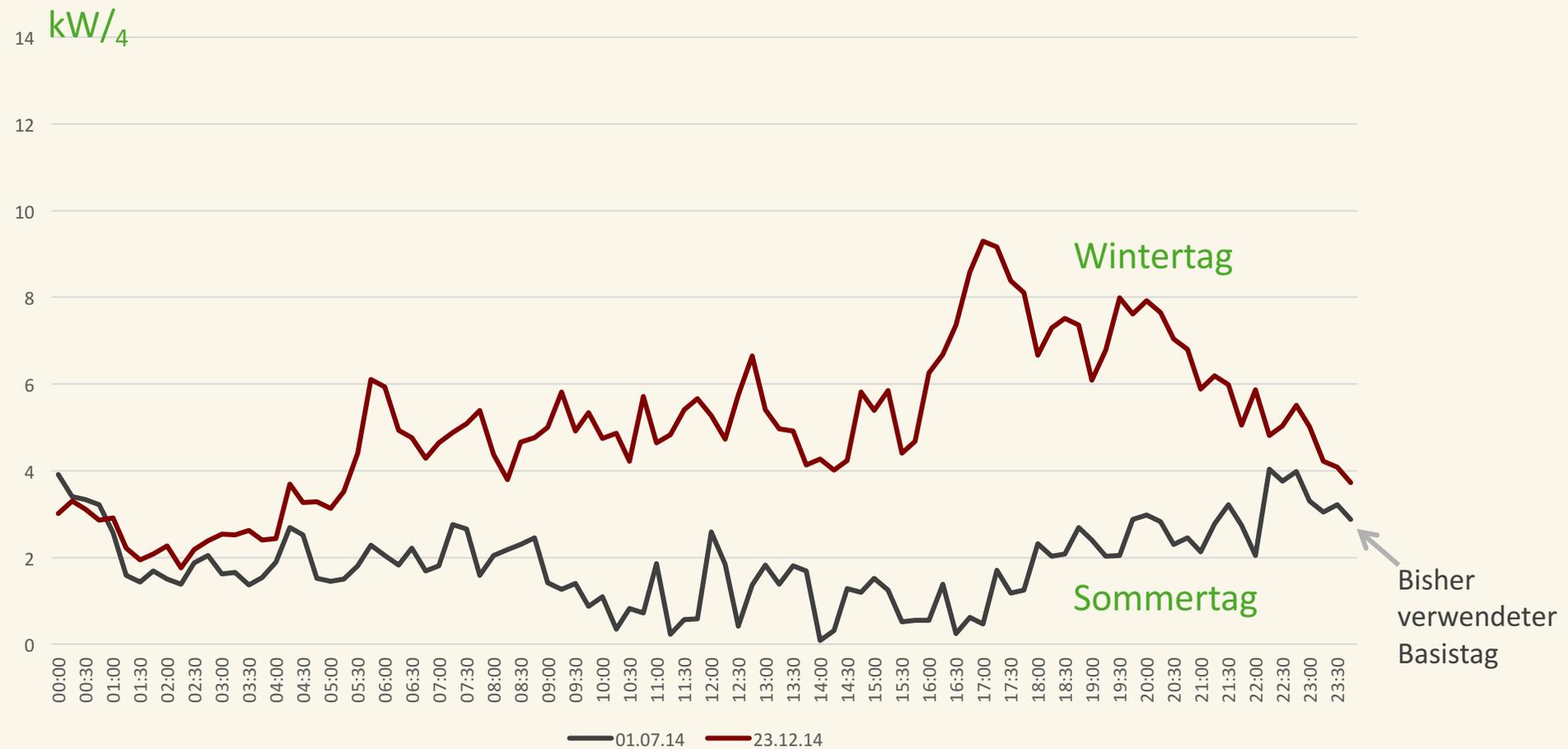
MASimBa



Heatmap Z13 – Linienzähler im Wohngebiet mit schwacher Eigenerzeugung



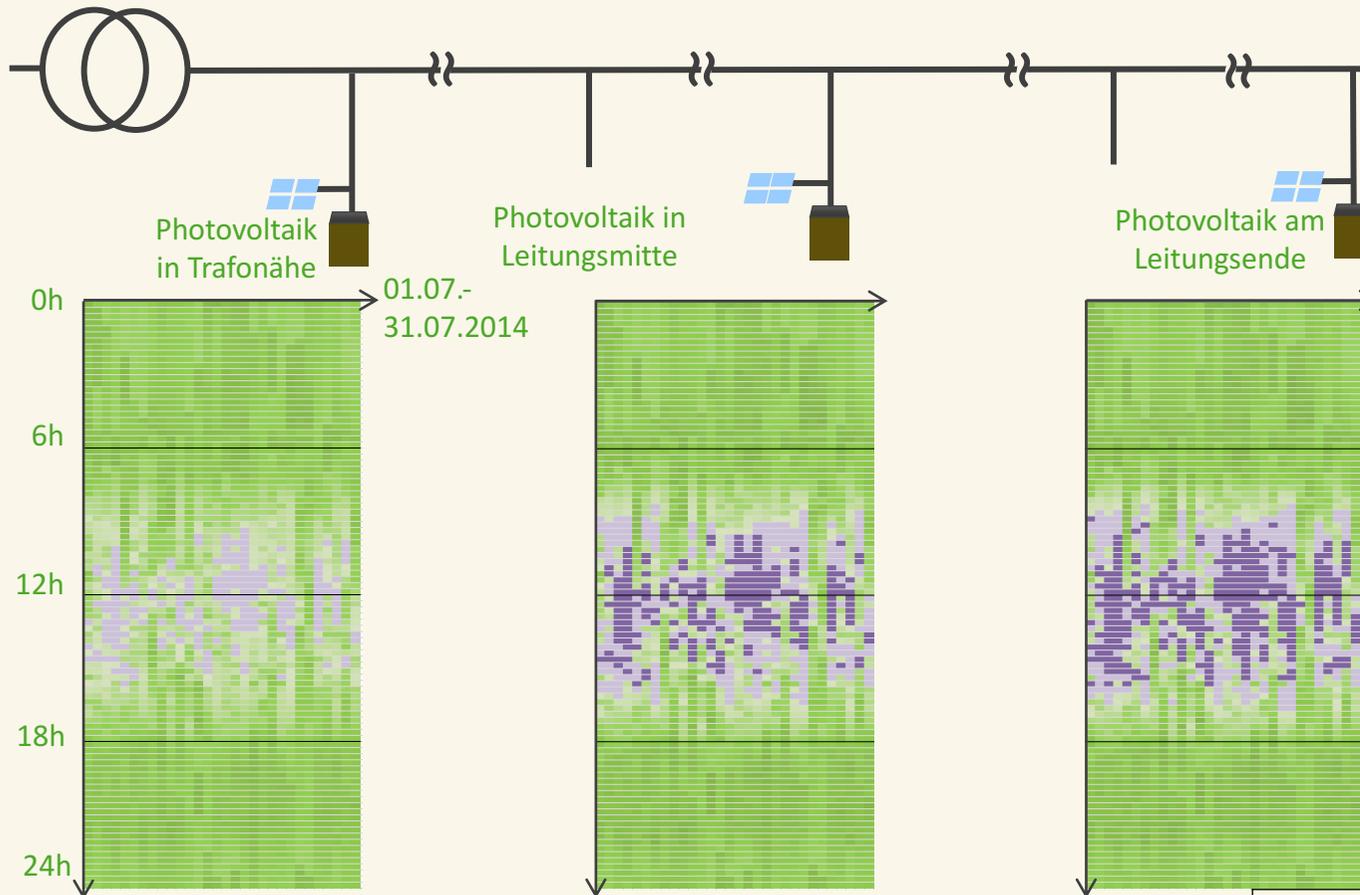
# Netzschleife weist im Winter eine wesentlich höhere Last am Trafo aus



1 Höherer Energieverbrauch von E-Fahrzeugen im Winter durch Heizung etc.  
 Quelle: Masimba; Beide Tage Dienstage

# Die Spannungsverletzungen nehmen über die Leitungslänge zu

Monatslauf Juli 2014, 30 HH an 740m Leitung, ca.100HH am Trafo , 3-fache PV-last ohne Steuerung

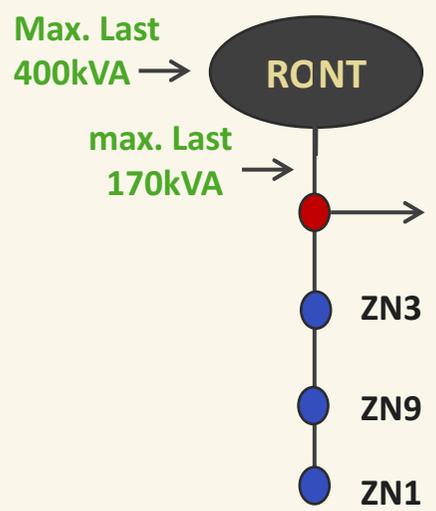


- Wie stark sollte abgeregelt werden?
- Welche Einspeisearbeit geht verloren?  
*Hypothese:* Geringere Abregelung als durch heutige harte Regelung; lokale Überspannung kann mit globalem Mangel zusammenfallen
- Entsteht aus PV-Mod nach EEG ein finanzieller Vorteil?

Spannung U (in V)		
größer 253	Un+10%	Lila Dunkel
Zwischen 248 und 253	Un+8%	Lila Hell
zwischen 248 und 212		Grün Verlauf

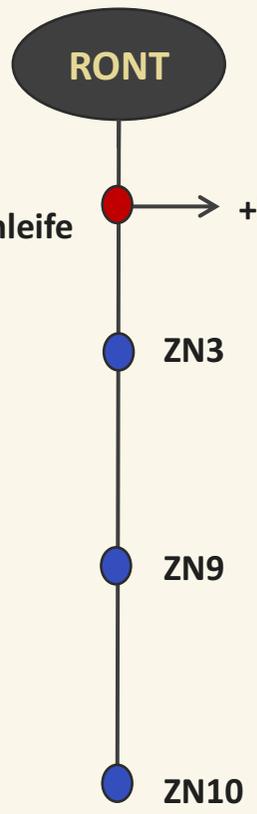
# Übersicht Netz- und Case-Varianten

**Base Case**  
~100 HH  
Leitung 370m

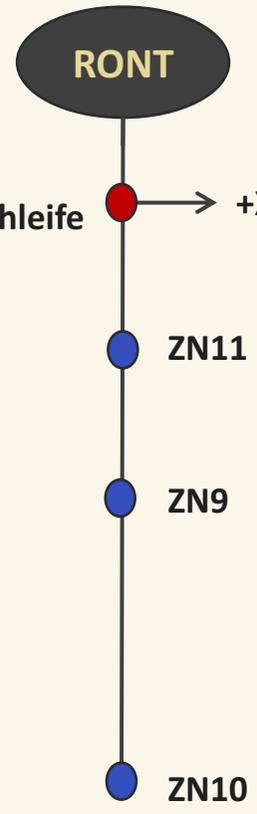


**Basis der  
Jahreslastkurve  
ist ein reales  
Netz**

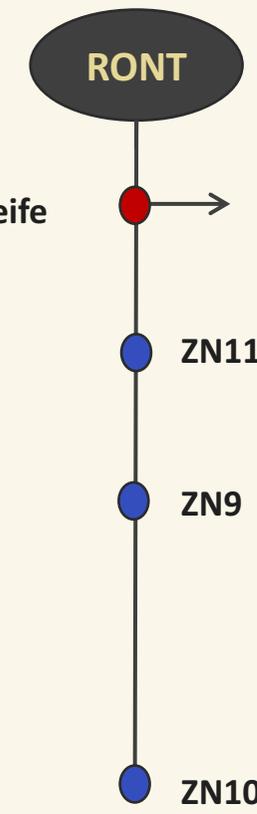
**Base Case  
dopp. Länge**  
Leitung 740m  
~100 HH



**Doppelte Last  
+ dopp. Länge**  
Leitung 740m  
~200 HH



**Dreifache Last  
dopp. Länge**  
740m  
~300 HH



# Der iMod hält das Netz selbst bei einer sehr hohen EV-Marktpenetration stabil

Monatslauf, Dez 2014, 12 EVs\* an 740m Leitung, ca. 28HH am Trafo , verdoppelte Haushaltslast, letztes E-Fahrzeug in der Netzschleife



Spannungsbandverletzungen

12EVs bei 28HH => 43% Marktpenetration für E-Fahrzeuge

### Weiterführende Fragen

- Ab wann braucht man den iMOD?
- Werden die Autos noch voll?
- Bleiben die Kunden zufrieden?

Spannung U (in V)		
zwischen 248 und 212		Grün Verlauf
zwischen 207 und 212	Un-8%	Gelb
Zwischen 207 und 195	Un-10	Rot
kleiner 195	Un-15%	Blau

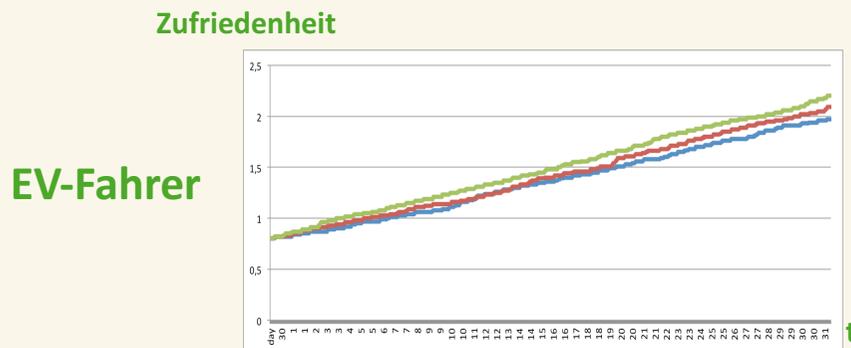
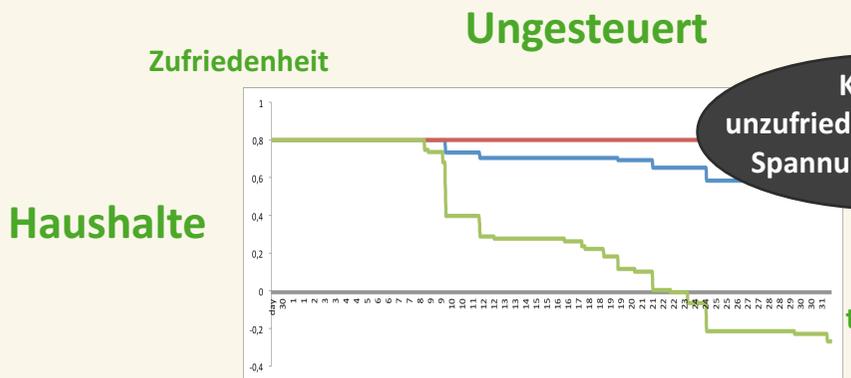
\*EV Electric vehicle

Quelle: Maren, Masimba; 2016; seriesImod\_testMatrix\_Dec\_12EV\_doubleLength (run,3,4,5) , erst.18.01.2017

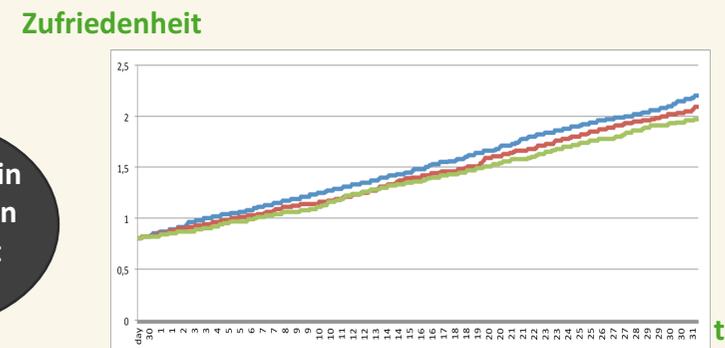


# ...gleichzeitig gelingt es, alle Kunden zuverlässig und zufriedenstellend zu versorgen

Entwicklung Kundenzufriedenheit, Dez 2014, 12 EVs an 740m Leitung, ca. 28HH am Trafo , verdoppelte Haushaltslast

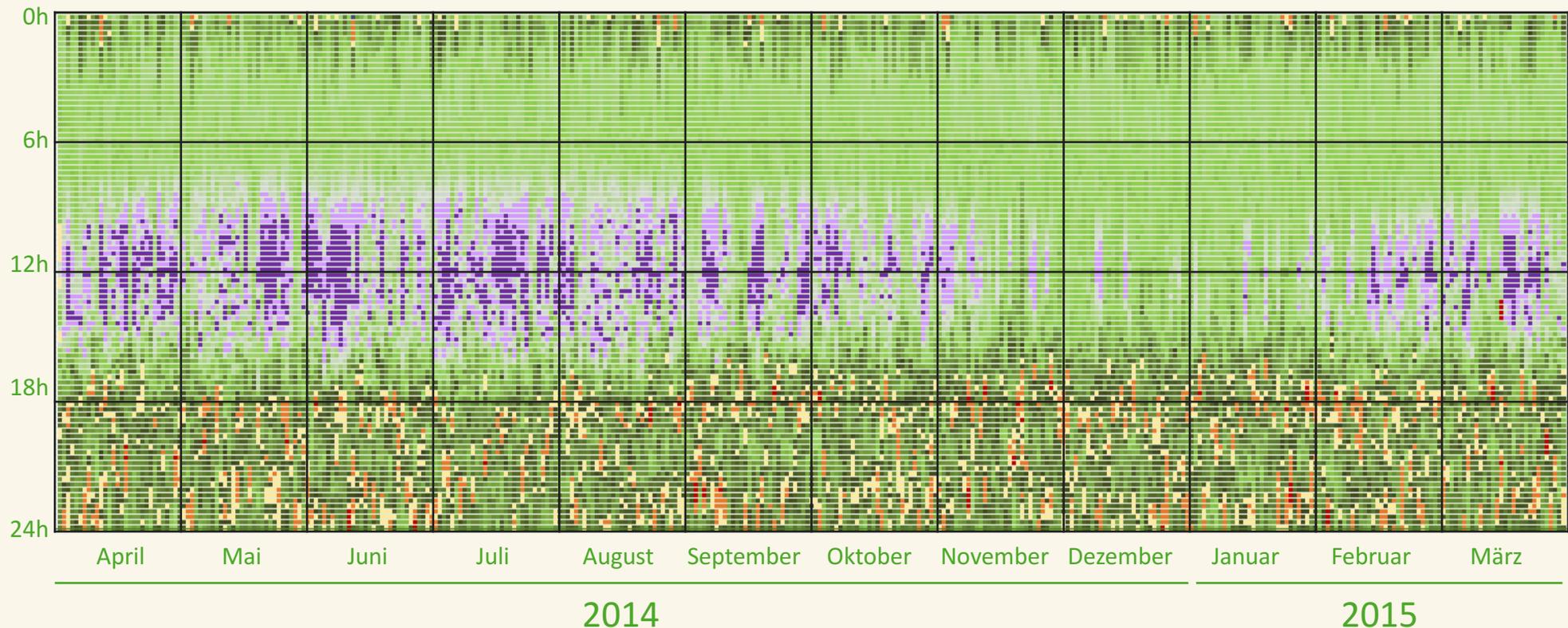


EVs werden in beiden Fällen zeitgerecht geladen



# Jahresperspektive – ungerregelt

12 PV-Anlagen, 12 E-Fahrzeuge, lange Netzschleife, 28 Haushalte mit Basislast

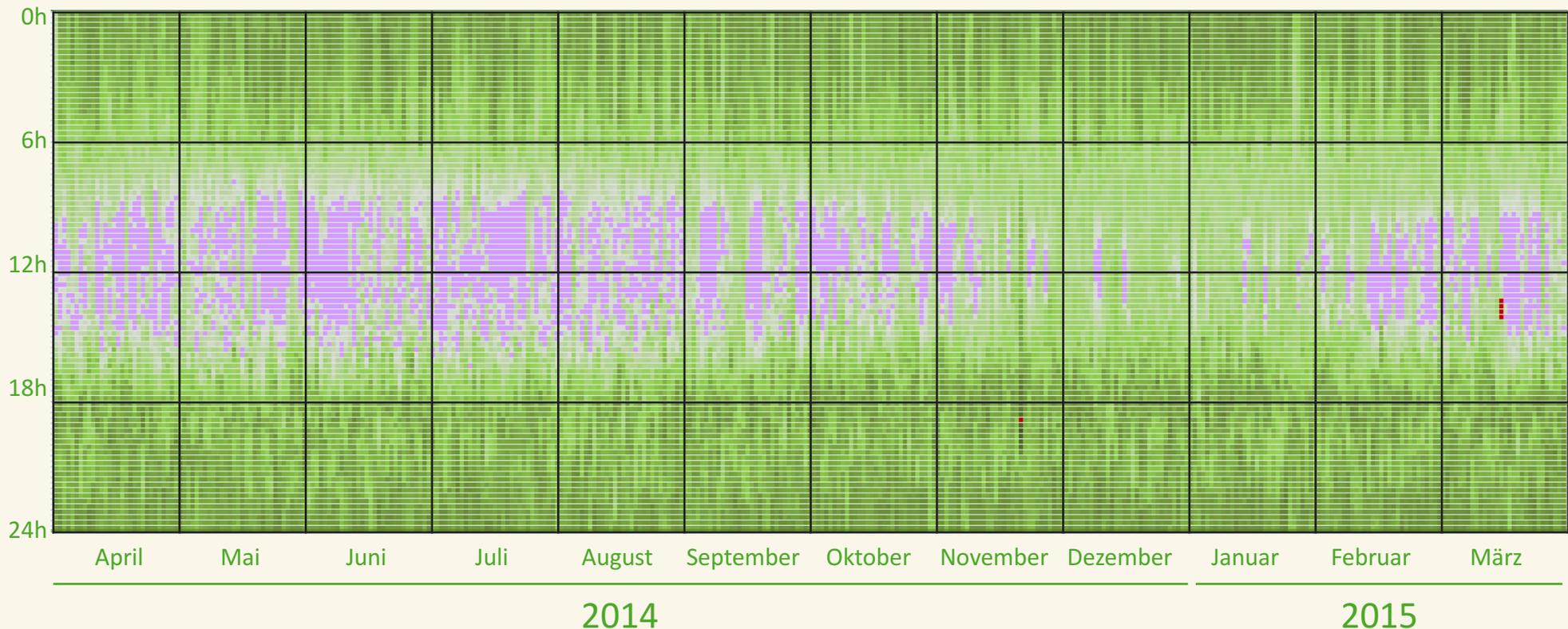


Ungerregelt führen die PV-Anlagen und EVs zu **über 2.000 kritischen Spannungsbandsverletzungen** nach oben und nach unten

>+10%	LilaDunkel
+8%-10%	Lila Hell
	Grün Verlauf
-8%-10%	Gelb
-10-15%	Orange
<-15%	Rot

# Jahresperspektive – iMod geregelt

12 PV-Anlagen, 12 E-Fahrzeuge, lange Netzschleife, 28 Haushalte mit Basislast



iMOD eliminiert die Verletzungen des Spannungsbandes

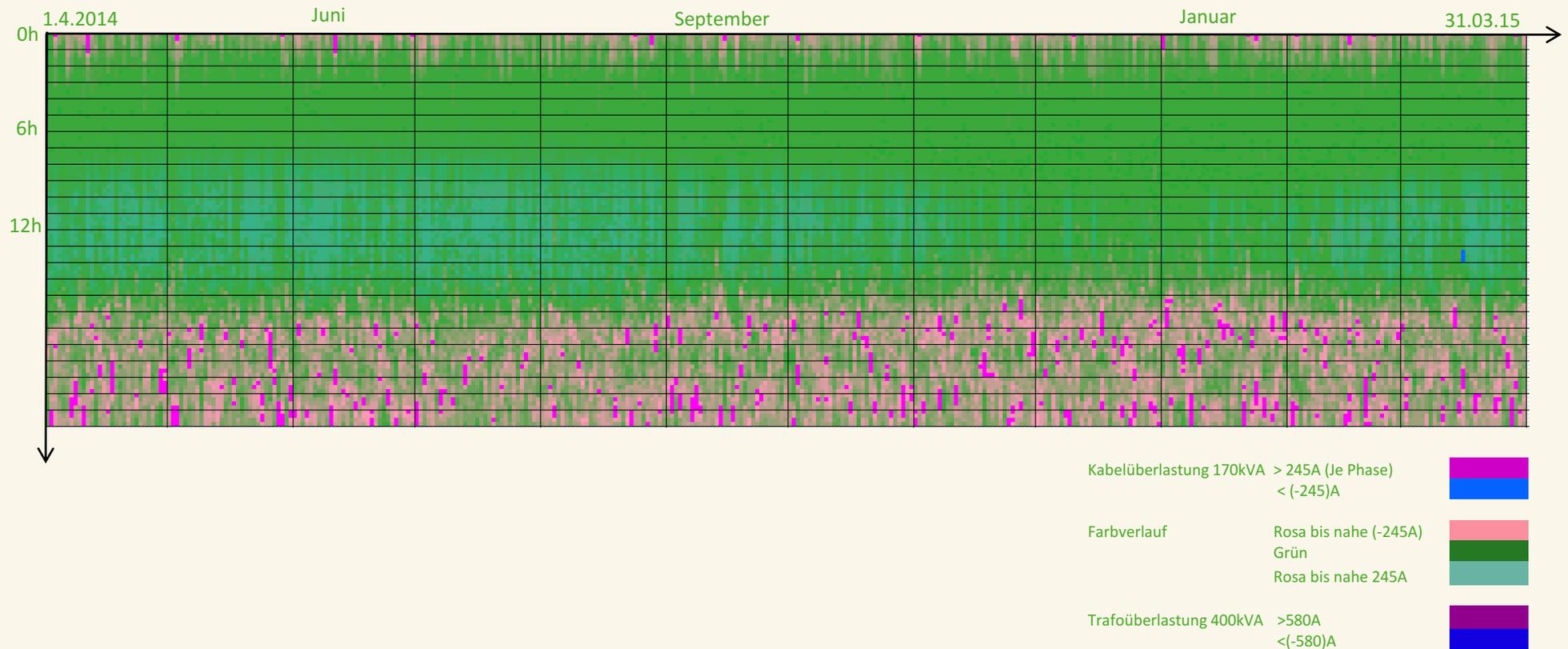
>+10%	LilaDunkel
+8%-10%	Lila Hell
	Grün Verlauf
-8%-10%	Gelb
-10-15%	Orange
<-15%	Rot



# Die ungesteuerte Schleife überlastet den Leiter am Trafo

Heatmap – Ströme Phase L2 im Leitungsabgang am Trafo –  
Photovoltaik und Elektrofahrzeuge UNGESTEUERT

In kW

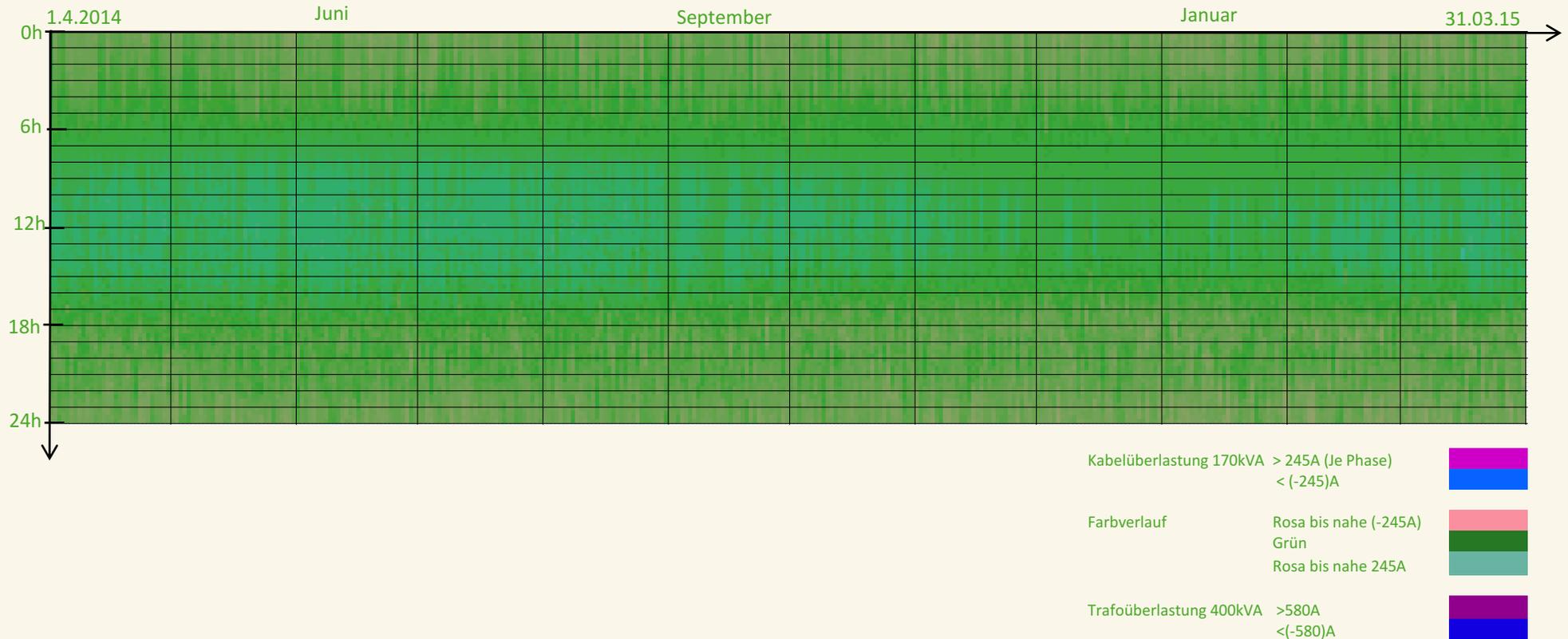




# Die iMod-geregelte Schleife hält die Leistung innerhalb der Kabelgrenzen

Heatmap – Ströme Phase L2 im Leitungsabgang am Trafo –  
Photovoltaik und Elektrofahrzeuge mit iMOD

In kW



# Die Auswirkungen auf die zukünftigen Netzkosten sind sehr hoch

Basis: 28 Haushalte mit  $\phi$ -Verbrauch von 3.500kWh/a

## Ohne iMOD

12 EVs erfordern Netzausbau und Ersatz des Trafos auf 800kVA

**Investition von ~100T€**

Amortisiert über 40 Jahre

=> Zusätzliche Kosten p.a. von 6.700€\* sind durch Netzkosten zu decken

Netzkosten steigen von ~4 auf ~6,7ct\* d.h. die **Netzkosten steigen um 67% oder je Haushalt um 94€ p.a.**

Aufwand: Verteilnetzausbau  
**100.000€ Investition durch Allgemeinheit zu tragen**

## iMOD

12 EVs können zusätzlich über das bestehende Netz versorgt werden

Bei Verbrauch 1 EV ~2.500kWh p.a. steigt die gelieferte Jahresarbeit von 98T kWh auf 128T kWh über das vorhandene Netz

Bei gleichem Ertrag für den Netzbetreiber **verteilen sich die Netzkosten** auf die größere Menge. Kosten pro kWh sinken damit von ~4ct/kWh auf ~3ct/kWh d.h. um **-25% oder je Haushalt um 35€**

Aufwand: 12 iMod zu 300€/Stück  
**3.600€ Investition durch E-Fahrzeughalter zu tragen (Verursacher)**

**Δ 129€ pro HH**

**>>**

\*2.500 Amortisation, 4.200€ Verzinsung Kapital mit 6%

# Partner der JSW Consulting und der Theron Advisory Group

## Profil Stephan Witt



Stephan Witts inhaltliche Schwerpunkte sind Strategie, Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, Digitalisierung, Innovationsmanagement insb. disruptiver Innovationen und Marketing/Vertrieb.

Seine Projekterfahrungen erstrecken sich über ein breites Spektrum verschiedener Industrien mit Schwerpunkten in der Chemie/ Biotechnologie/BioÖkonomie, Infrastruktur-/Energiewirtschaft, Maschinenbau, Elektromobilität und Internet/IT in verschiedenen Ländern West-Europas sowie den USA.

Stephan Witt verfügt darüber hinaus über umfangreiche Erfahrung als Manager auf Zeit für die Vermarktung von Industriestandorten sowie als Interim-Geschäftsführer. So hat er z.B. als Gründungscluster-Manager den Spitzencluster BioEconomy aufgebaut. Als Mentor begleitete er eine Vielzahl an Startups, insb. im Bereich digitalisierter Dienstleistungen.

### Ausbildung

Bankkaufmann (Deutsche Bank)  
Dipl.-Kaufmann, Technische Universität Berlin/University of Illinois at Urbana-Champaign

### Branchenfokus

Energie, Maschinenbau, Internet/IT, Elektromobilität, Chemie/BioÖkonomie,

### Themenschwerpunkte

Strategie, („disruptive“) Innovationen, Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, Vertrieb/Marketing, Startup Coaching

### Erfahrung

25 Jahre Beratungserfahrung,

### Beruflicher Hintergrund

- Deutsche Bank
- McKinsey & Co., Inc., Berlin/Boston,
- CII Group
- JSW Consulting GmbH (Partner) seit 1998
- Theron Advisory Group (Partner) seit 2010



**Kontakt allgemein:**

Stephan Witt

Meinekestr.. 26  
10719 Berlin

Tel +49 30 889 221 - 0  
eMail [stephan.witt@theron.com](mailto:stephan.witt@theron.com)

