



Smart Nord

# Dezentral koordinierte Systemdienstleistungsbereitstellung

Smart Nord – Teilprojekt 2

Leitung: Jun.-Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff

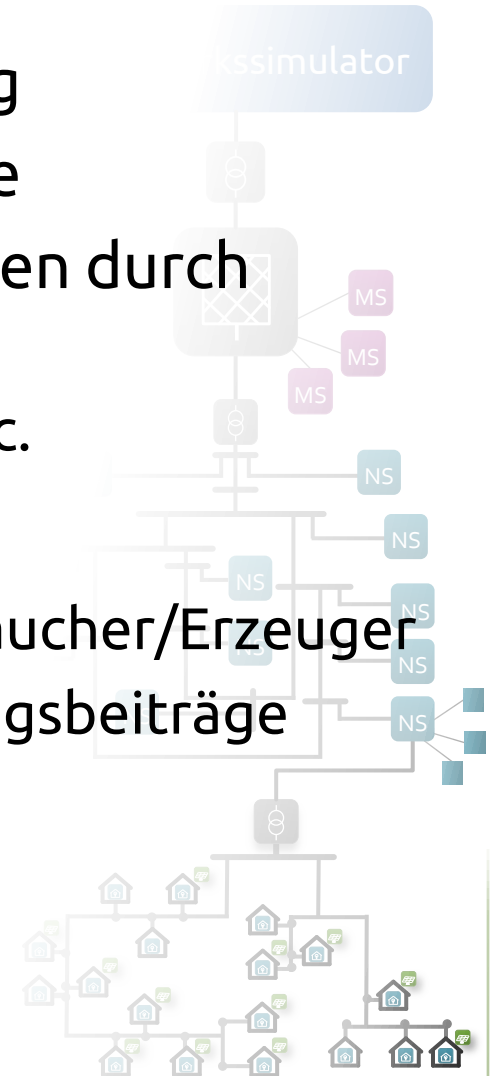
OFFIS – Institut für Informatik

# Zentrale Fragestellung

*„Wie lässt sich das Konzept  
selbstorganisierter koordinierter  
Anlagenverbände auf die Bereitstellung  
**netzstützender Systemdienstleistungen**  
erweitern?“*

# Motivation

- Dezentralisierung der Energieversorgung
- Verdrängung konventioneller Kraftwerke
- Bereitstellung von Systemdienstleistungen durch dezentrale Erzeuger/Verbraucher
  - Frequenzregelung, Spannungshaltung etc.
- Besondere Herausforderungen:
  - Stochastische, prognoseunsichere Verbraucher/Erzeuger
  - Lokale Verortung netzstützender Leistungsbeiträge
  - Harte Echtzeitanforderungen
  - Systemstabilität
  - Umrichtersystemmodelle

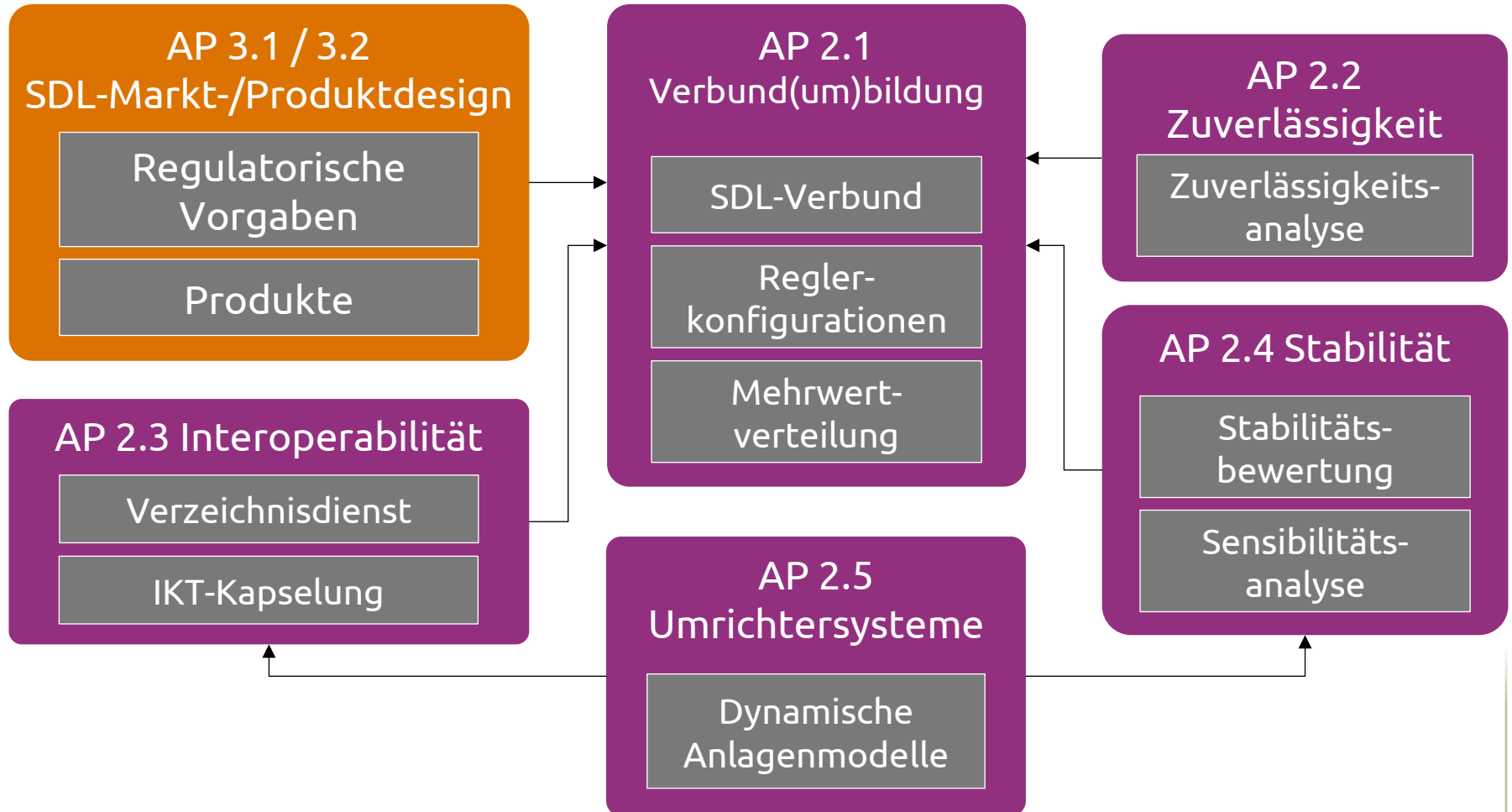
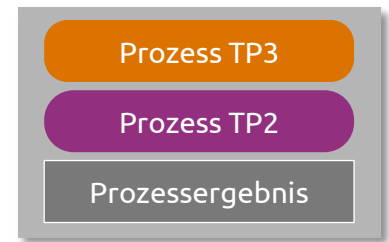


# Themen und MitarbeiterInnen

- AP2.1 – SDL-Verbundbildung
  - Thole Klingenberg (OFFIS)
- AP2.2 – Zuverlässigkeits- und Risikobewertung
  - Marita Blank (Universität Oldenburg)
- AP2.3 – Interoperabilität
  - Robert Bleiker (OFFIS)
  - Klaus Piech (OFFIS)
- AP2.4 – Stabilität von SDL-Verbänden in NS-Netzen
  - Mauro Calabria (Technische Universität Braunschweig)
- AP2.5 – Netzstützende Systemdienstleistungen aus Gerätesicht
  - René Dietz (Leibniz Universität Hannover)
  - Felix Fuchs (Leibniz Universität Hannover)



# Überblick der Prozesse: SDL-Markt, Verbundbildung



# SDL-Verbundbildung

Arbeitspaket 2.1

Thole Klingenberg (OFFIS)

Jun.-Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff (OFFIS)

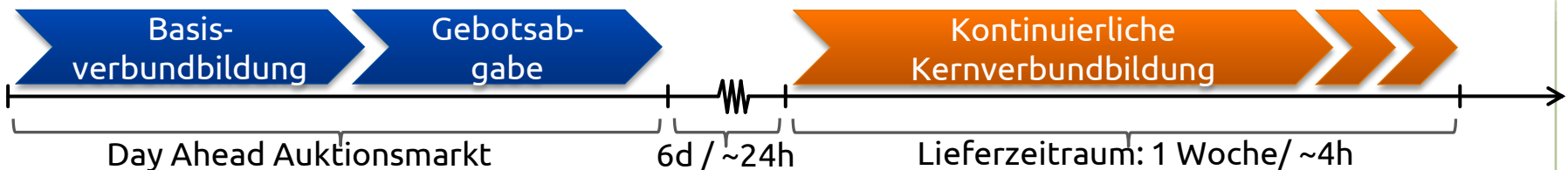
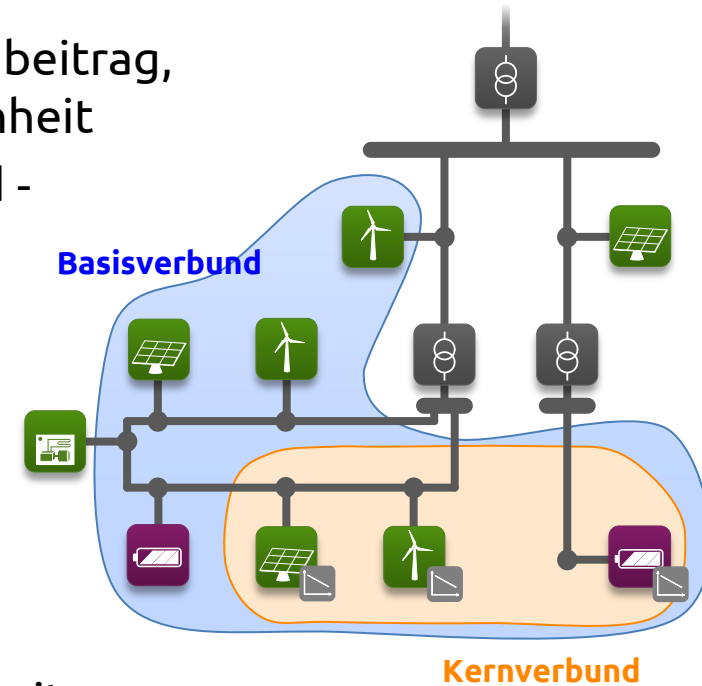


# Fragestellung und Methodik

- Zentrale Forschungsfrage:
  - Wie lassen sich SDL garantiert und in Echtzeit auf Basis von Verbänden dezentraler prognoseunsicherer Verbraucher und Erzeuger bereitstellen?
- Ziel:
  - Entwicklung eines Verbundbildungsmechanismus, der den hohen Anforderungen an die Vorhaltung und Bereitstellung von netzstützenden SDL genügt
  - Berücksichtigung der Dynamik einer dezentralen SDL-Bereitstellung
- Methodik:
  - Umsetzung eines zentralen Verbundbildungsansatzes, für SDL-Produkte mit vorgegebenem Umfang, Zuverlässigkeit und Dynamik
  - Parametrierung lokaler Regler und Statikkennlinien für eine kommunikationslose Aktivierung der SDL in Echtzeit
  - Verteilung und Bewertung des zentralen Optimierungsansatzes

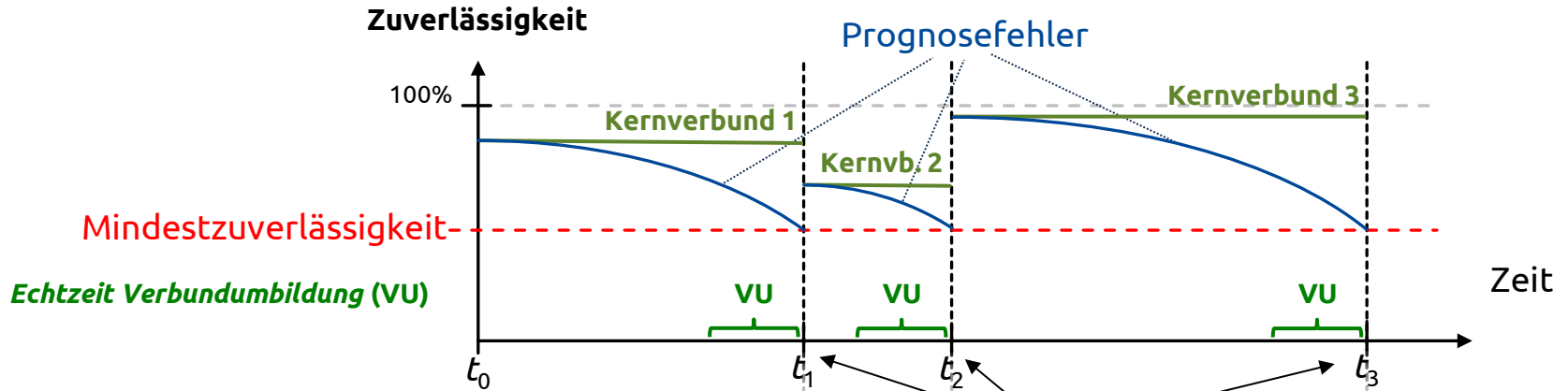
# Ergebnis 1: Basis- und Kernverbünde

- Basisverbundbildung (■):
  - Day-Ahead: Initialer Verbund; nur Verbundbeitrag, noch keine konkreten Beiträge für jede Einheit
  - Mindestzuverlässigkeit, Produktgröße und -zeitraum fest vorgegeben
- Kernverbundbildung (■):
  - Zur Lieferzeit: Bilden eines Kernverbunds; Festlegen konkreter Statikkennlinien für Anlagen eines Basisverbundes
  - Mindestzuverlässigkeit u. Produktgröße vorgegeben, *Lebensspanne variabel*
  - Lebensspanne beeinflusst die Zuverlässigkeit eines Kernverbundes

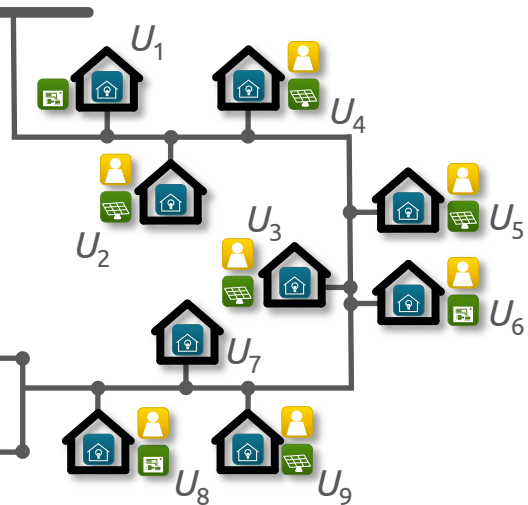
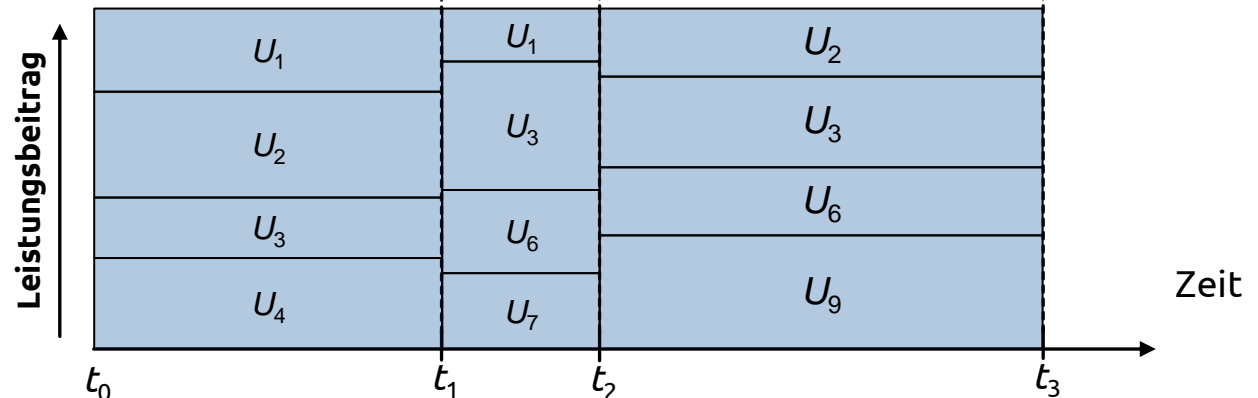




# Ergebnis 2: Kernverbund(um)bildungsprozess



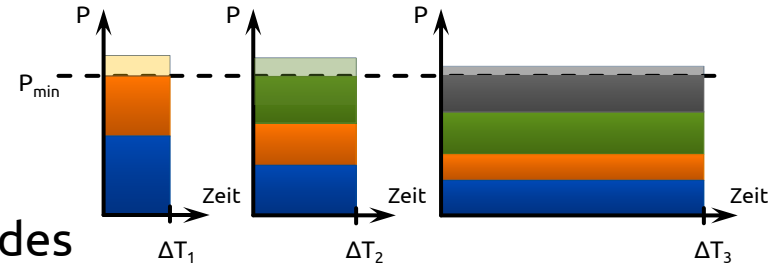
Absinken der Zuverlässigkeit löst eine (Echtzeit) Kernverbundumbildung aus



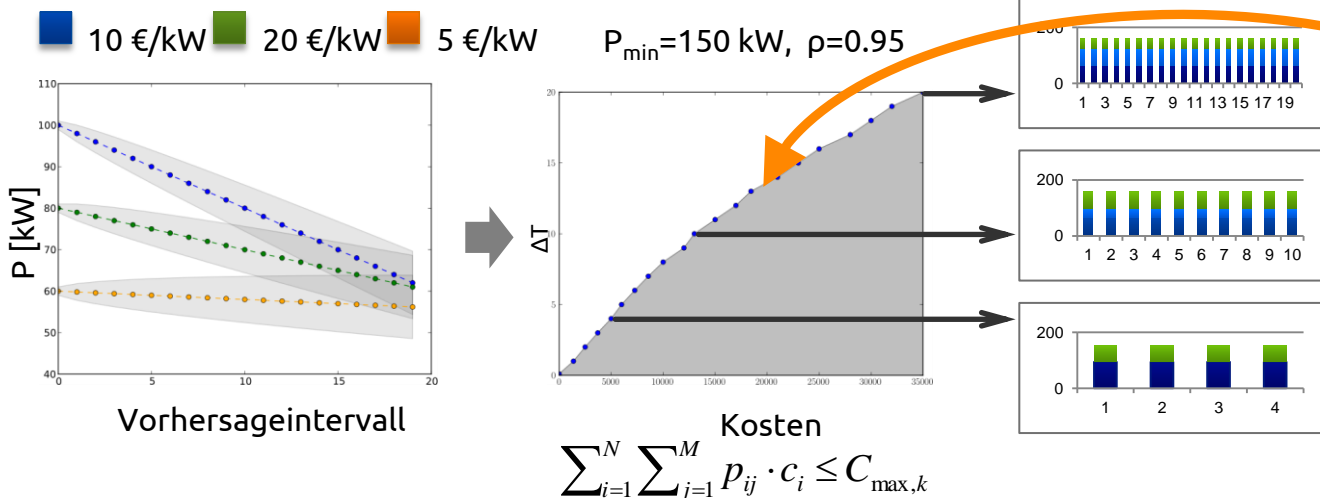
# Ergebnis 3: Zentraler Optimierungsansatz und Mehrwertverteilung

- Zugrunde liegendes kontinuierliches Optimierungsproblem

- Minimiere die Kosten eines Kernverbundes
- Maximiere die Lebensdauer eines Kernverbundes
- Nebenbedingungen: Mindestzuverlässigkeit und Stabilität



## Exemplarische Optimierung mit IBM ILOG CPLEX

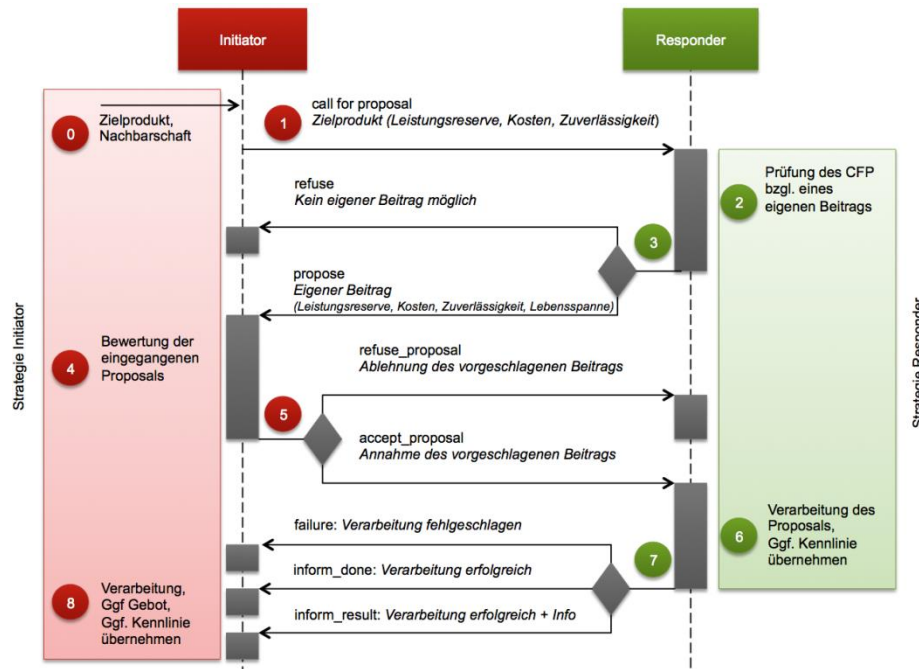


Auswahl der „richtigen“ Lösung auf der Pareto-Front



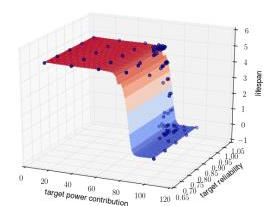
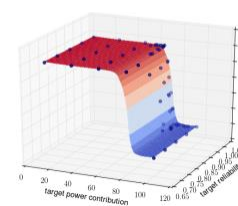
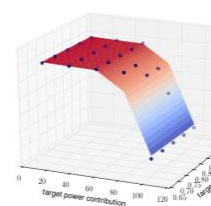
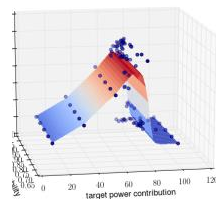
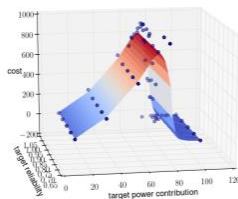
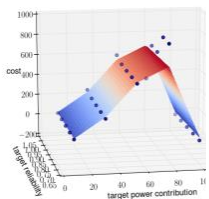
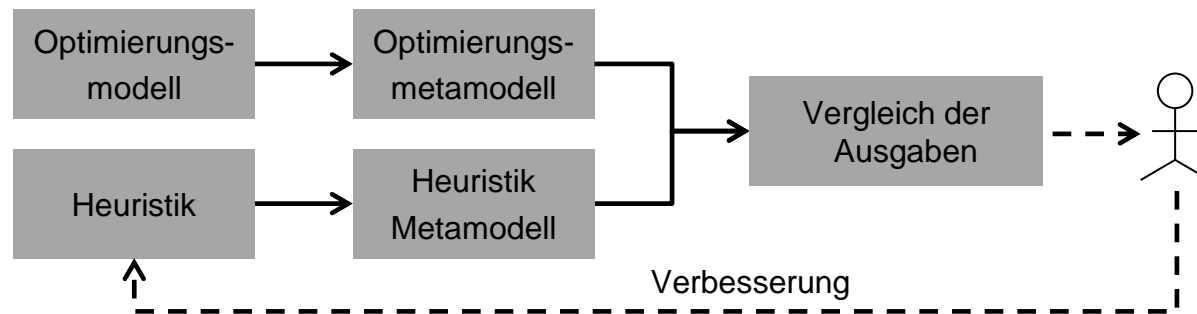
# Ergebnis 4: dezentrale SDL-Verbundbildung

- Dezentralisierung des zentralen Optimierungsansatzes
  - Verwendung des Contract Net-Protokolls
  - Heuristische Reduktion der initialen Nachbarschaft (Basisverbund), bis kein besserer Kernverbund mehr gefunden wird oder die Zeit abgelaufen ist
  - CPLEX-basierte Implementierung als Benchmark



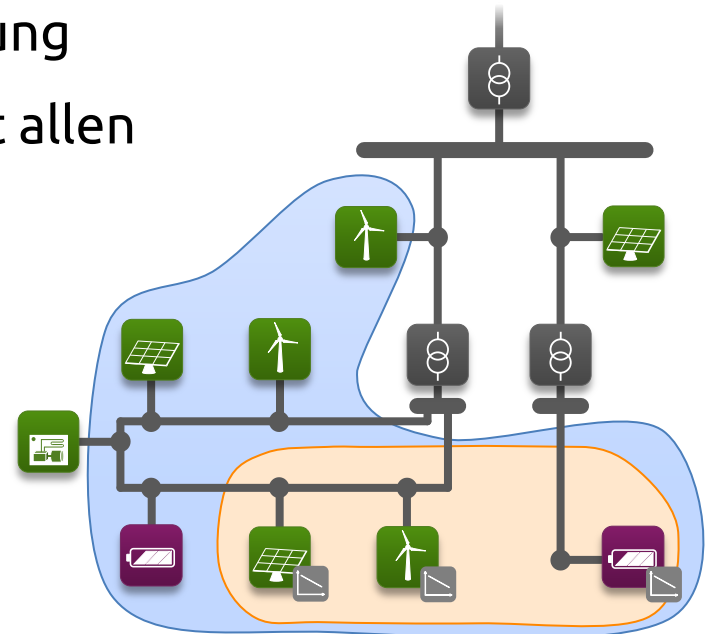
# Ergebnis 5: Prozess zur Bewertung dezentraler Verbundbildungsstrategien

1. Erzeugen eines Metamodells des Input/Output-Verhaltens des optimalen (CPLEX) Ansatzes
2. Erzeugen eines Metamodells des Input/Output-Verhaltens der Heuristik
3. Bewertung der Qualität (Güte) der Heuristik durch Bestimmung der Distanz beider Metamodelle voneinander



# Zusammenfassung und Ausblick

- Entwicklung eines Mechanismus zur optimierten Einsatzplanung von dezentralen Anlagen zur Bereitstellung von SDL
  - Basis- und Kernverbünde
- Kommunikationsbasierte zuverlässige, ökonomische Optimierung
- Kommunikationslose (stabile) Aktivierung
- Enge erfolgreiche Zusammenarbeit mit allen TP2-internen APs



# Zuverlässigkeits- und Risikobewertung

Arbeitspaket 2.2

Marita Blank (Universität Oldenburg)  
Jun.-Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff (OFFIS)

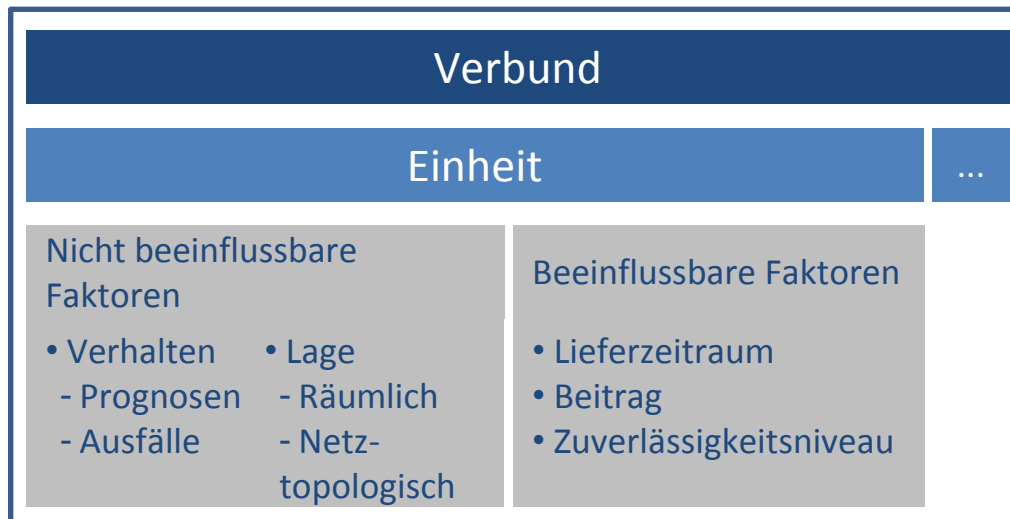


# Fragestellung und Methodik

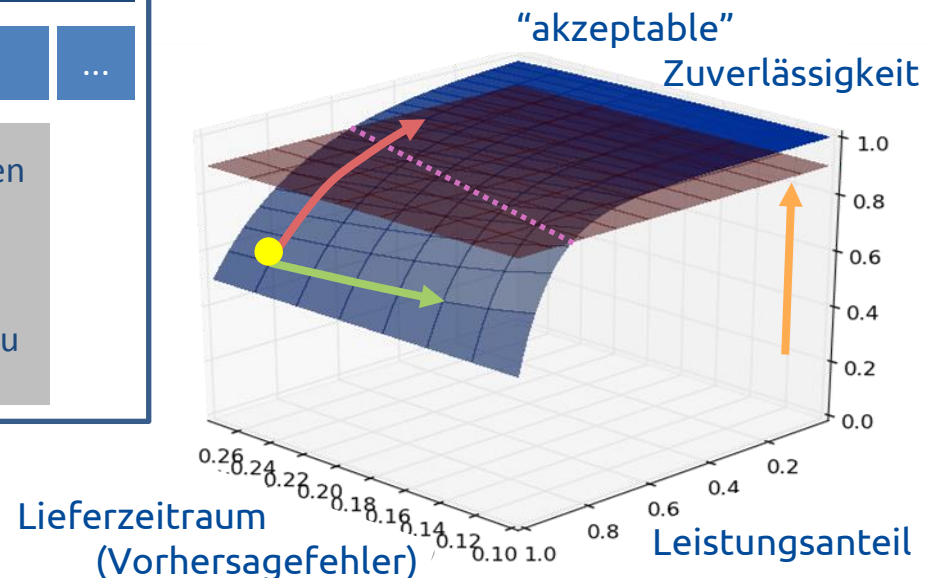
- Zentrale Forschungsfrage:
  - Wie können dezentrale Verbände hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit für die Bereitstellung von SDL bewertet werden?
- Ziel:
  - Entwickeln einer Methodik zur Bewertung dezentraler Verbände hinsichtlich der Zuverlässigkeit, mit der SDL vorgehalten werden können
  - Berücksichtigung von Prognosen, Prognosefehlern und Abhängigkeiten zwischen den Einheiten
  - Bewertung des entstehenden Risikos
- Methodik:
  - Definition von Zuverlässigkeit für SDL-Verbände
  - Bestimmen und Modellierung der Faktoren der Zuverlässigkeit
  - Simulative Ermittlung und Analyse von Verbundzuverlässigkeiten und Nichterbringungsrisiken

# Ergebnis 1: Hierarchisches Bewertungsmodell

**Zuverlässigkeit eines Verbundes** bzgl. der Vorhaltung eines SDL-Produktes ist die Wahrscheinlichkeit, mit der das Produkt innerhalb des Produktzeitraums unter normalen Betriebsbedingungen verfügbar ist.



Zusammenhang beeinflussbarer Faktoren

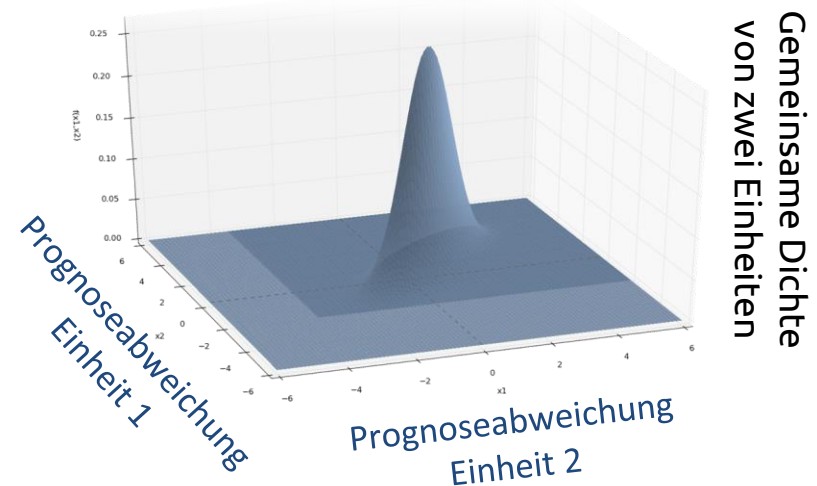
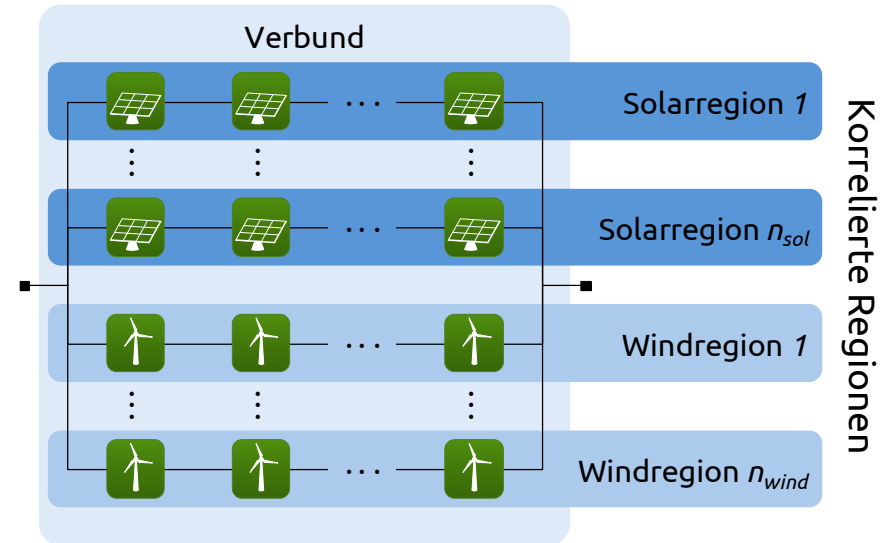




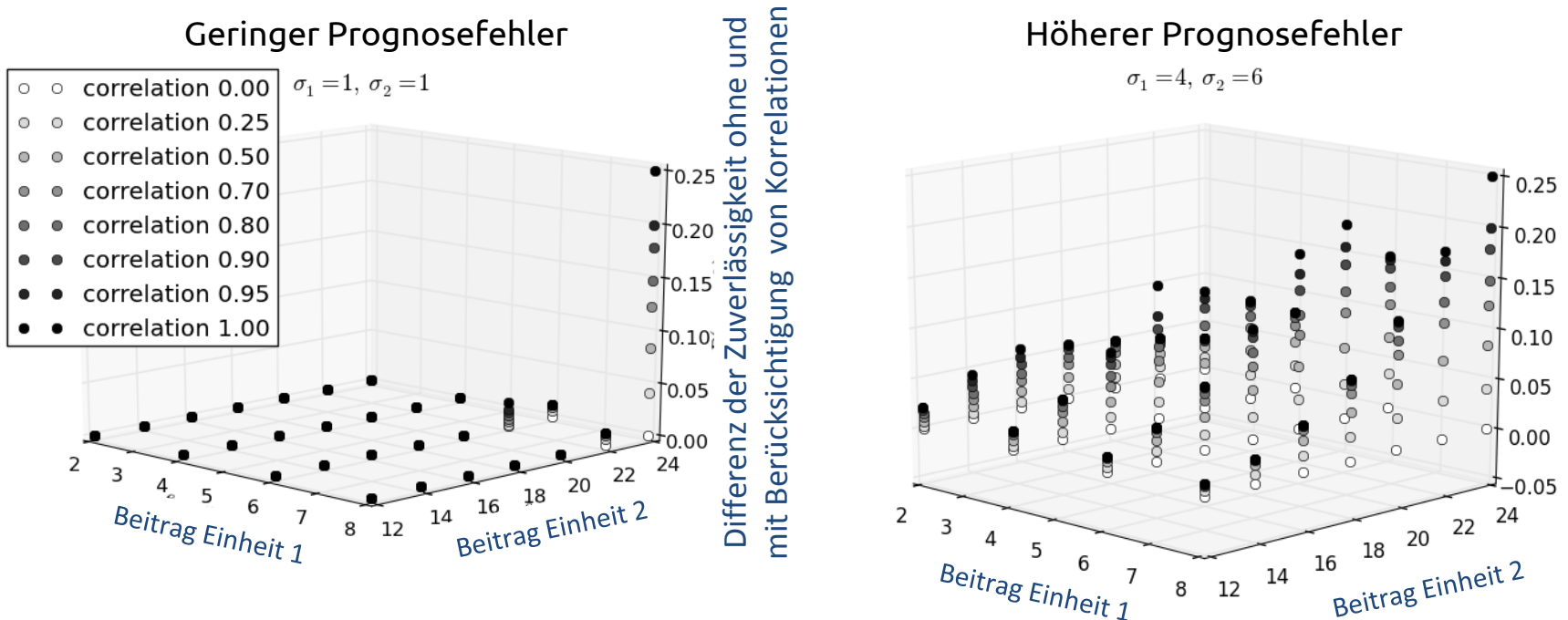
# Ergebnis 2: Bewertung räumlicher Zuverlässigkeit

- Einteilung in Regionen auf Basis von Korrelationen
- Gemeinsame Verteilungsfunktion der Prognosefehler aller Einheiten innerhalb einer korrelierten Region
- Darstellung gemeinsamer Überlebens-Wahrscheinlichkeit über Copula-Funktionen
- Zuverlässigkeit: Gemeinsame Wahrscheinlichkeit, dass Prognoseabweichungen jeder Einheit oberhalb toleriertem Wert

$$\rho_C = \mathbb{P}(X_1 \geq x_1, \dots, X_n \geq x_n)$$



# Ergebnis 3: Einfluss von Korrelationen

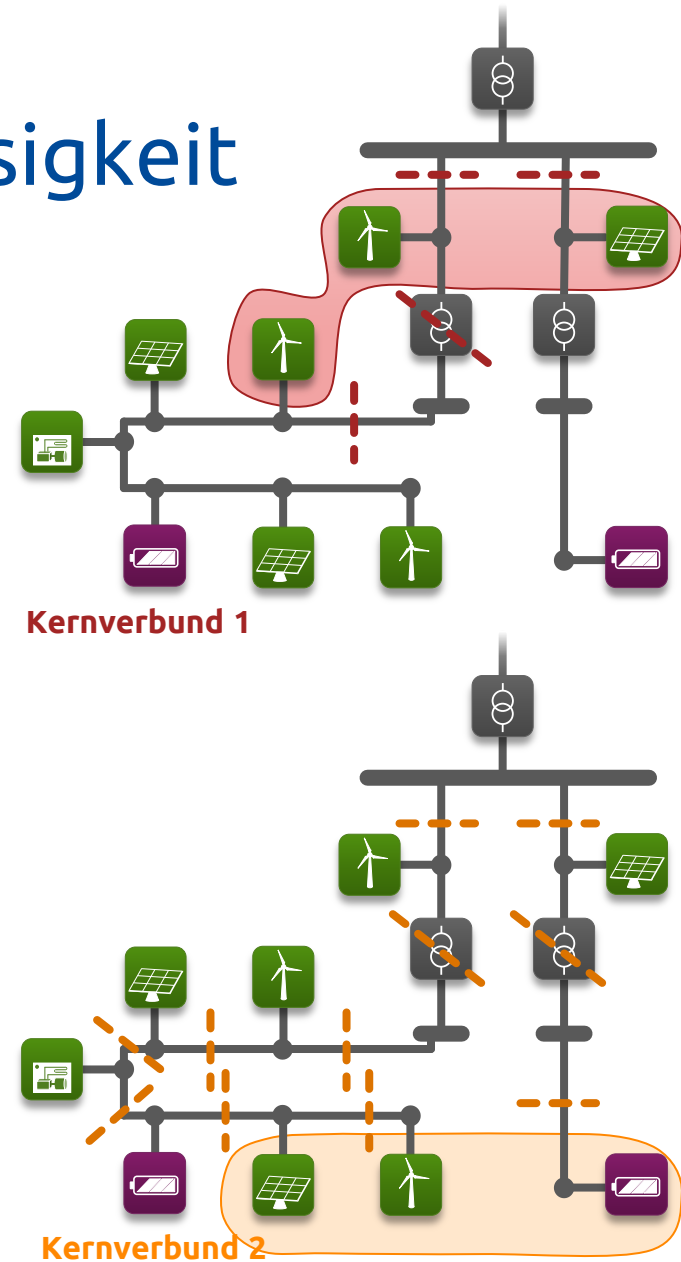


- „Korrelierte Zuverlässigkeit“
  - Höher als „unkorrelierte Zuverlässigkeit“
  - Erhöht sich mit höheren Korrelationskoeffizienten
- Korrelationen haben höheren Einfluss
  - Je schlechter die Vorhersagen
  - Wenn Anteile der Beiträge an Prognose ähnlich

# Ergebnis 4: Topologische Zuverlässigkeit

- Abbilden des Netzes auf einen Graphen
- Abbilden der Einheiten auf diesen Graph
- Bestimme Menge der Schnitte des Graphen bzgl. aller Einheiten im Kernverbund  $K_C$
- Bewertung über Ausfallwahrscheinlichkeiten der den Schnitten entsprechenden Betriebsmittel  $\text{fail}(E)$
- Zuverlässigkeit eines Verbundes:

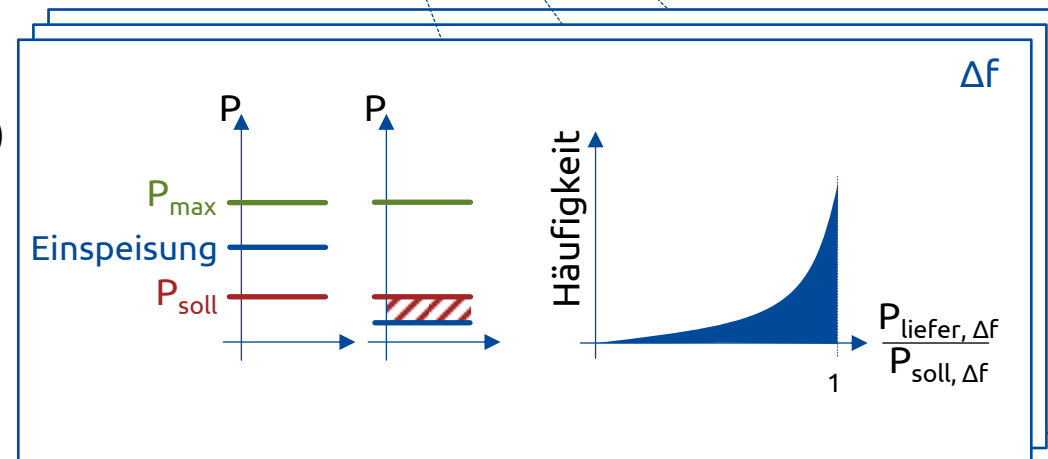
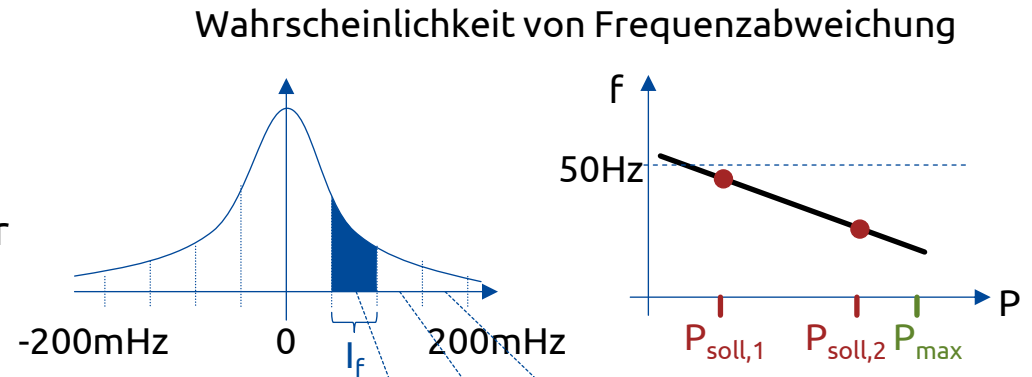
$$\rho_G = \prod_{E \in K_C} (1 - \mathbb{P}(\text{fail}(E)))$$



Minimale Schnitte verschiedener Kernverbünde

# Ergebnis 5: Risikobewertung

- Gegeben: Auftretswahrschk. einer Frequenzabweichung in einem Intervall  $I_f$
- Für jedes Intervall: Bestimmen des zu liefernden Beitrags  $P_{soll}$
- Für jedes Intervall: Simulation der Häufigkeit der Nichterfüllung durch Prognosefehler (MC-basiert)
- Risiko: Leistungsgewichtete Wahrscheinlichkeit der Nichterbringung zugesagter Leistung
- Erweiterung zu VaR zur Bestimmung von Mindestanforderungen der Verbundbildung (optimale Faktorstufen?)

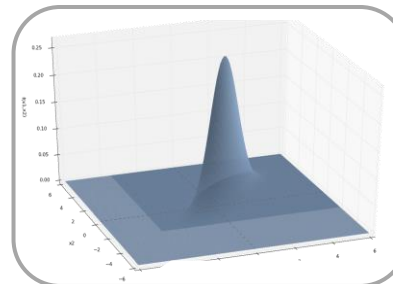
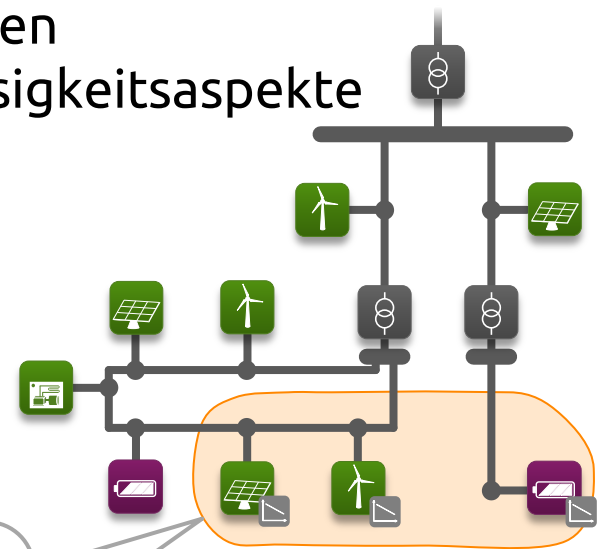


Häufigkeit von Abweichungen zugesagter Leistung

$$\text{Risiko} = \sum_{I_f} \mathbb{P}(\Delta f \in I_f) \cdot \mathbb{P} \left( \frac{P_{liefer, \Delta f}}{P_{soll, \Delta f}} < 1 - \varepsilon \mid \Delta f \right) \cdot P_{soll, \Delta f}$$

# Zusammenfassung und Ausblick

- Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit dezentraler Verbünde SDL unter Berücksichtigung von zeitlichen und räumlichen Aspekten
- Möglichkeit der individuellen oder integrierten Verwendung/Berücksichtigung der Zuverlässigkeitsaspekte
- Risikobewertung nicht erbrachter SDL durch dezentrale Verbünde
- Rückschlüsse auf Anforderungen an Rahmenbedingungen der Verbundbildung



# Interoperabilität

## Arbeitspaket 2.3

Klaus Piech (OFFIS)

Robert Bleiker (OFFIS)

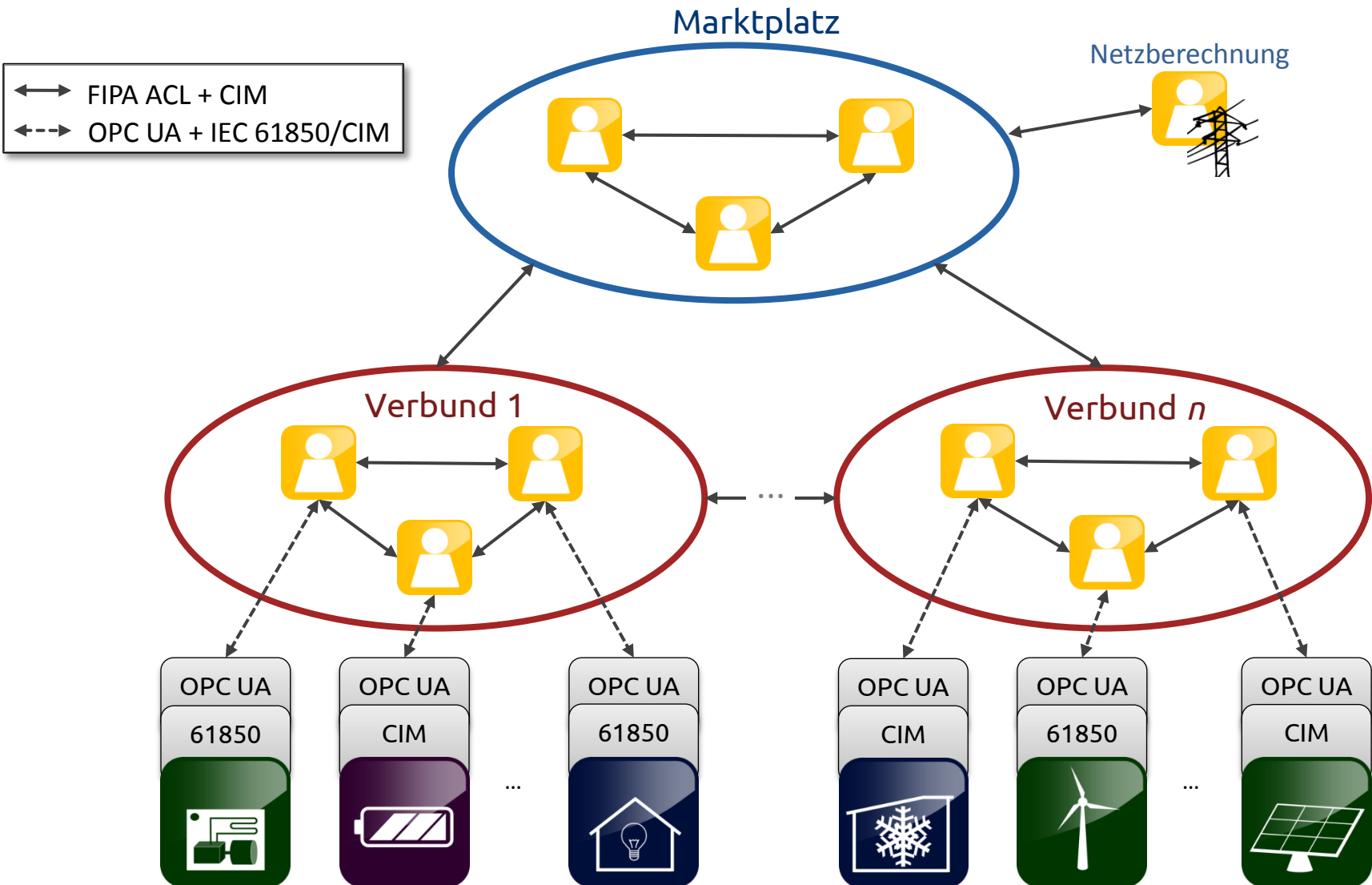
Jun.-Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff (OFFIS)



# Fragestellung und Methodik

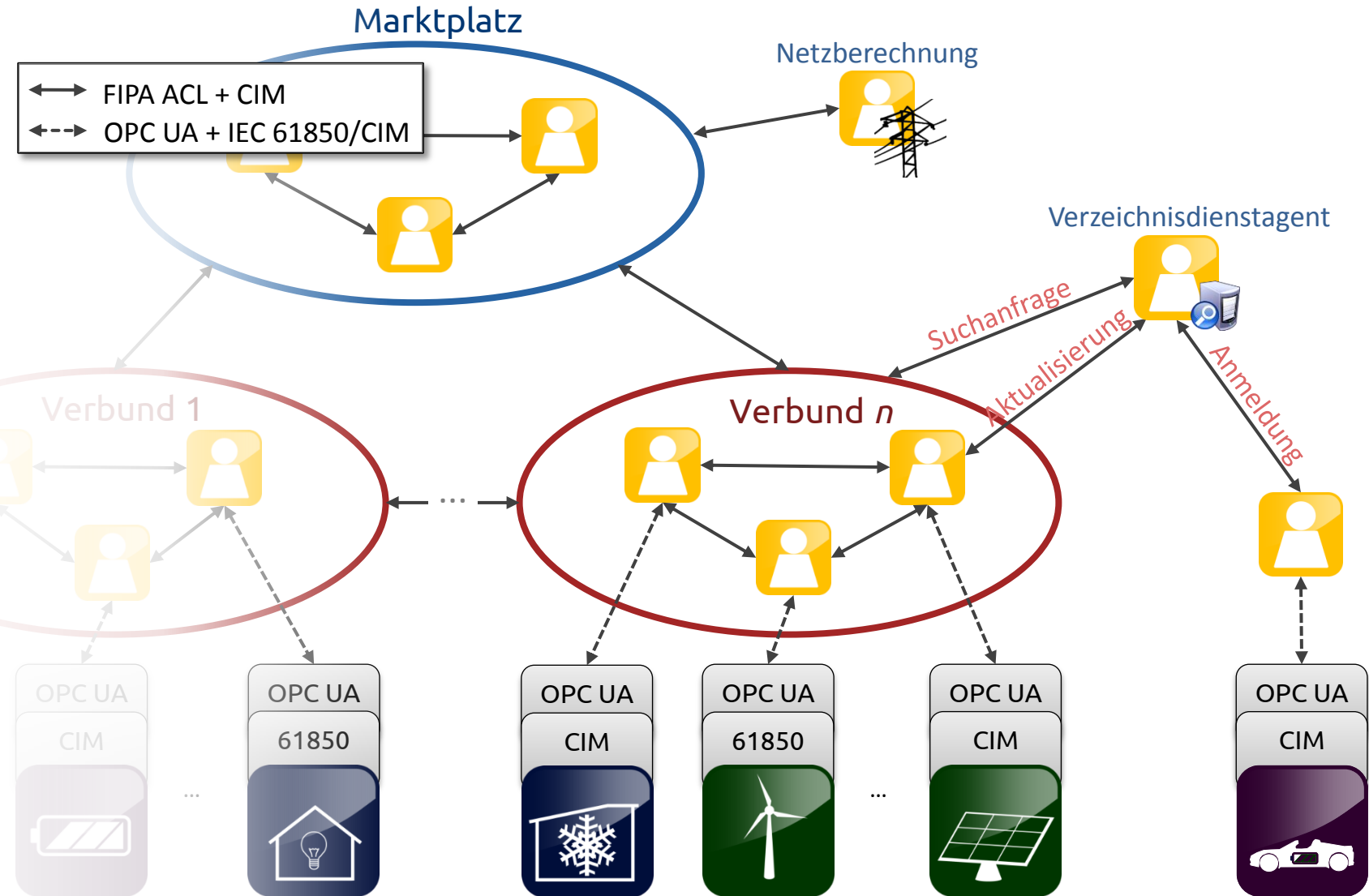
- Ziele:
  - Unterstützung des Gesamtprojektvorhabens durch den Einsatz Internationaler Standards (IEC 61970, IEC 61850, IEC 62541)
  - TP-übergreifende Nutzung (Kommunikation zwischen Anlagen, Agenten und Verbänden)
  - Übertragbarkeit der Projektergebnisse
- Methodik:
  - Entwicklung eines automatisierten Mappings für IEC 61970 und IEC 61850 Modelle
  - Entwicklung eines Verzeichnisdienstes für Verbundbildungen in TP1+2

# AP 2.3 Interoperabilität – Ziele und Methodik



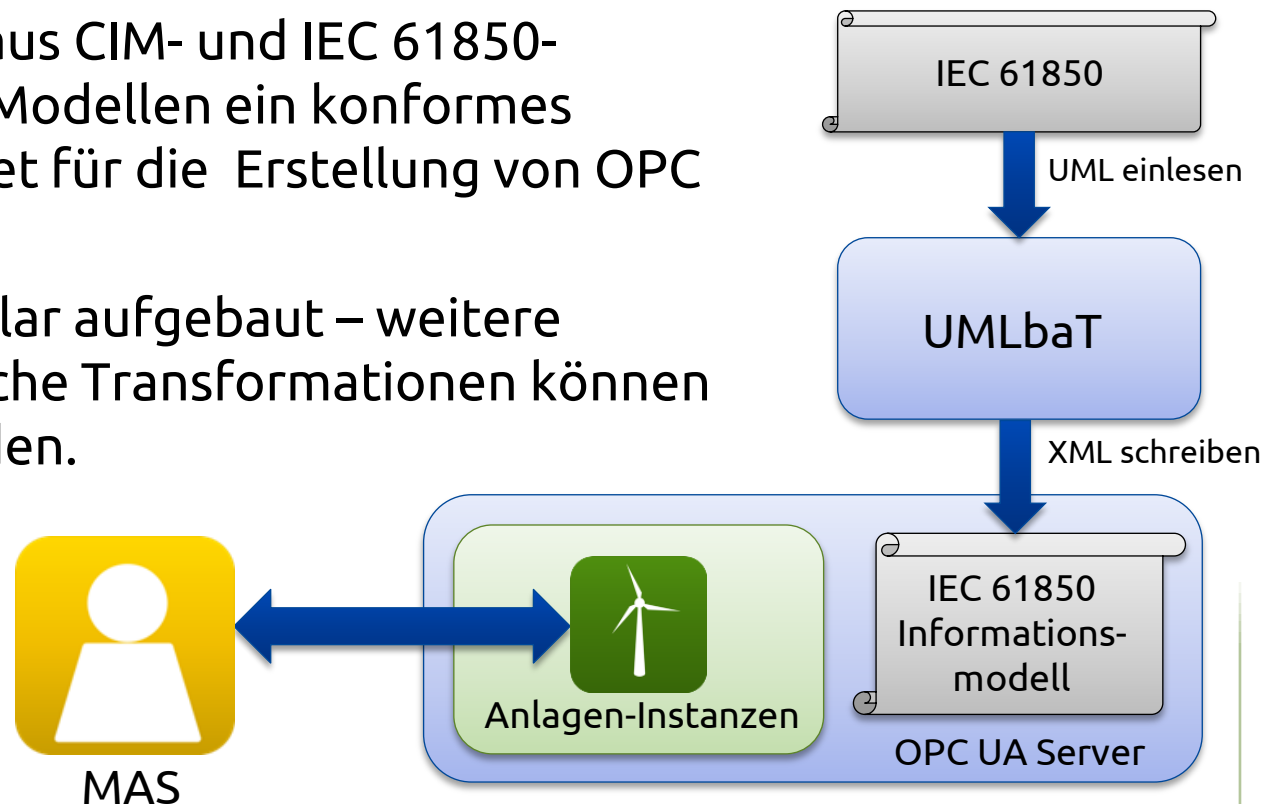


# AP 2.3 Interoperabilität – Ziele und Methodik



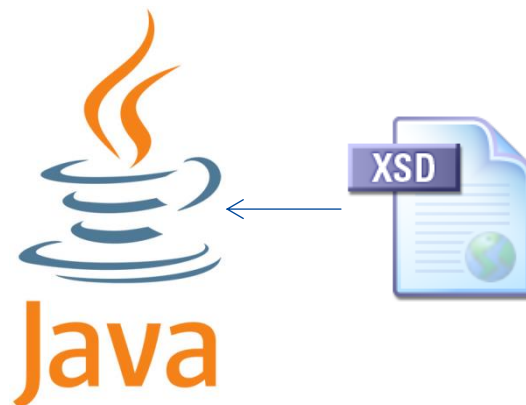
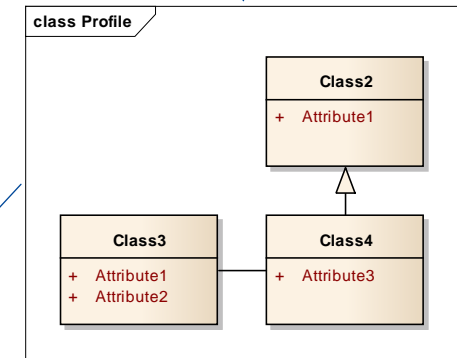
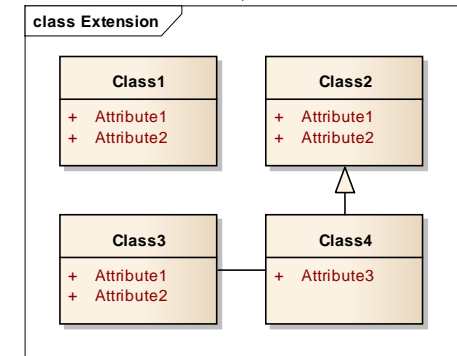
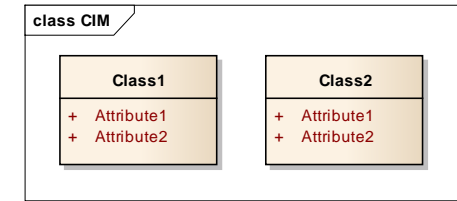
# Ergebnis 1: automatisierte OPC UA-Kapselung

- IEC 61850-Mapping abgeschlossen
- Entwicklung eines frei verfügbaren Software-Tools ([www.umlbat.de](http://www.umlbat.de))
- UMLbat erzeugt aus CIM- und IEC 61850-konformen UML-Modellen ein konformes IEC 52641 NodeSet für die Erstellung von OPC UA Servern
- UMLbaT ist modular aufgebaut – weitere domänenspezifische Transformationen können hinzugefügt werden.



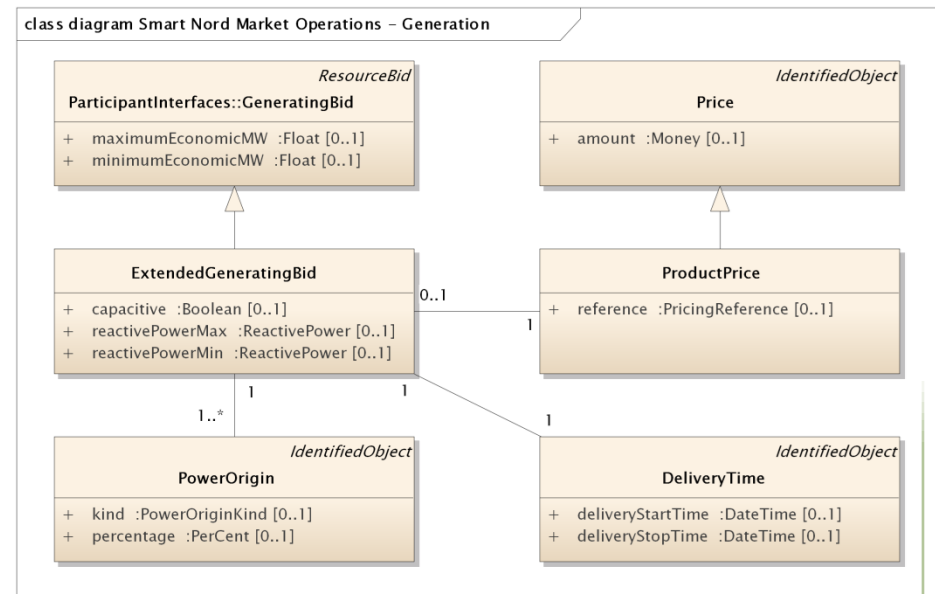
# Ergebnis 2: CIM-Profil

- CIM als Datenmodell für die Agent-zu-Agent-Kommunikation (XML)
- CIM-Profil fertiggestellt
- Java-Klassen für die De- und Serialisierung von CIM-Objekten wurden generiert
- Erweiterung um zusätzliche Elemente vorbereitet (z.B. Reputationen)



# Ergebnis 2: CIM-Profil (cont'd)

- CIM-Modell erweitert um 4 SmartNord-Pakete
- SmartNordAgents:
  - Klassen die den Agenten beschreiben (z.B. Agent)
- SmartNordDomain
  - SmartNord-spezifische Datentypen (z.B. AID)
- SmartNordMarketOperations
  - Klassen die die Markttransaktion beschreiben (z.B. ProductPrice)
- SmartNordYellowPages
  - Klassen die die Suchanfrage des Verzeichnisdienstagenten beschreiben (z.B. SearchRequest)



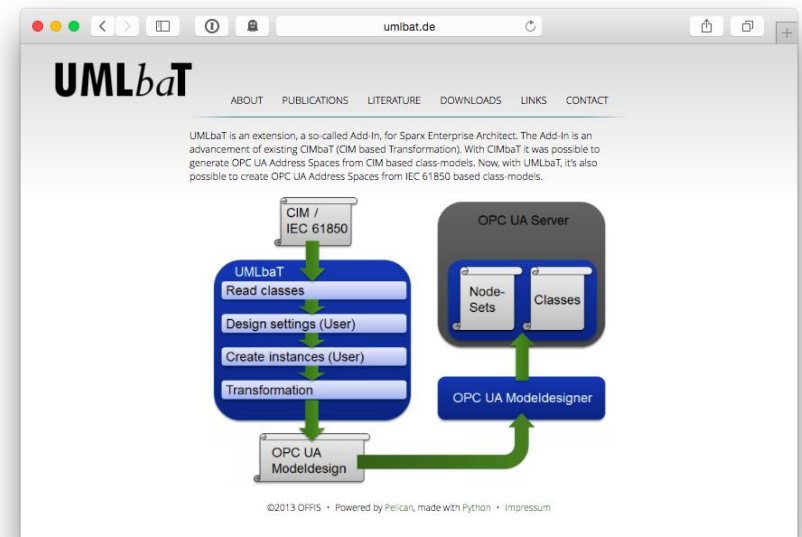
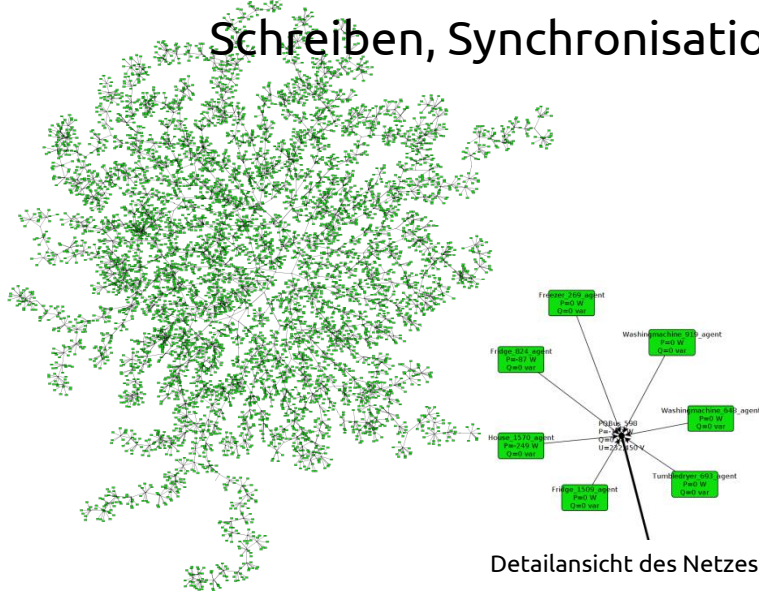
# Ergebnis 3: Verzeichnisdienst

- Der Verzeichnisdienst unterstützt die Verbundbildung
- Ermöglicht die Suche nach Nachbaranlagen (Angabe einer maximalen Entfernung möglich)
- Der Prototyp hat sich in TP 1 (Verbundbildung und reaktive Einsatzplanung) bewährt und kann auf weiteres so bestehen bleiben
- Agent erweitert um CIM → Kommunikation über CIM-Nachrichten möglich (XML)
- Kommunikation über CIM ermöglicht Debugging, da menschenlesbar
- Ermöglicht für Testzwecke (Debugging) eine Visualisierung des Netzes und der vorhanden Anlagen



# Zusammenfassung AP 2.3

- OPC UA Kapselung abgeschlossen, evaluiert und dokumentiert
- Integration von CIM und IEC 61850 als Datenmodelle für standardisierte Kommunikation in Smart Nord über OPC UA
  - Verwendung innerhalb der Simulation (Datenaustausch zwischen Anlagensimulationen in mosaik)
  - Kommunikation innerhalb des Multiagentensystems (Suchen, Lesen, Schreiben, Synchronisation)



# Stabilität von SDL-Verbänden in NS-Netzen

Arbeitspaket 2.4

Mauro Calabria (Technische Universität Braunschweig)

Prof. Dr.-Ing. Walter Schumacher (Technische Universität Braunschweig)

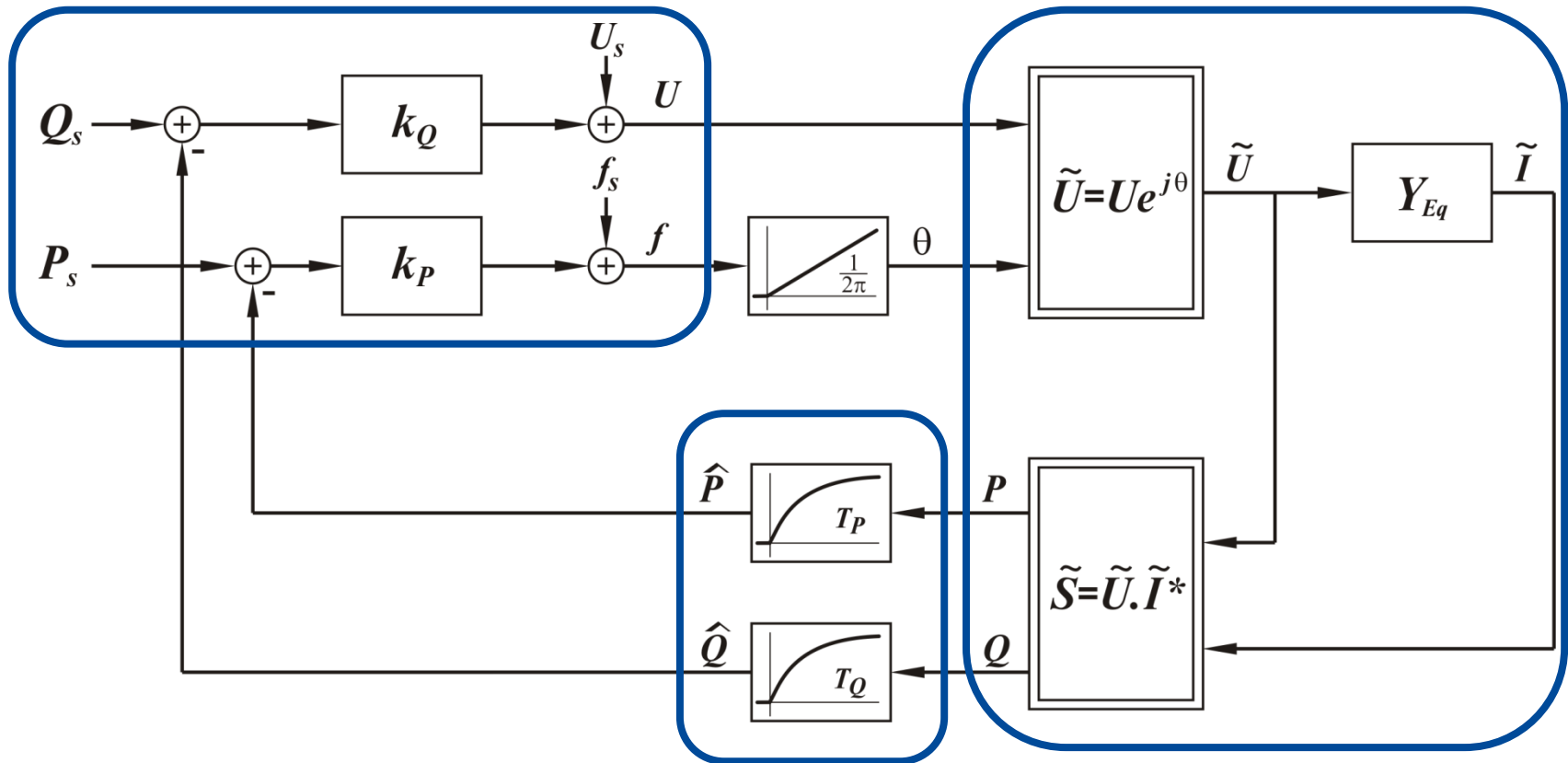


# Fragestellung und Methodik

- Zentrale Forschungsfragen:
  - Welchen Einfluss haben mehrere verteilte Erzeuger auf die Stabilität eines NS-Netzes?
  - Wie können diese Effekte modelliert und ggf. kompensiert werden?
- Ziel:
  - Dezentrale und stabile Bereitstellung von Systemdienstleistungen in NS-Netzen
- Methodik:
  - Dynamische Modellierung eines SDL-Verbundes anhand der Netzkopplung, der Dynamik der Anlagen und deren Statikkennlinien
  - Erweiterung der Statikkennlinien mit einem PDT-Regler, um den gewählten Verbund zu stabilisieren bzw. zu dämpfen
  - Herleitung eines aggregierten Makro-Modells zur Einbindung in das MS-Netzmodell



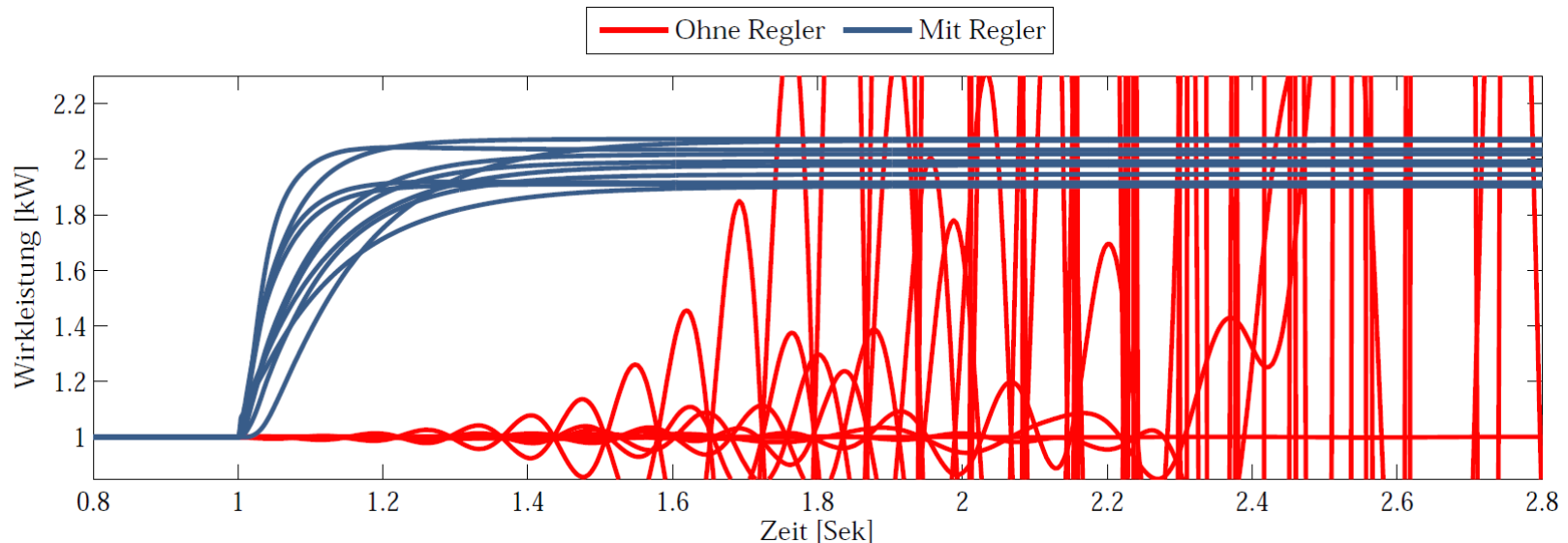
# Ergebnis 1: Nichtlineares Modell



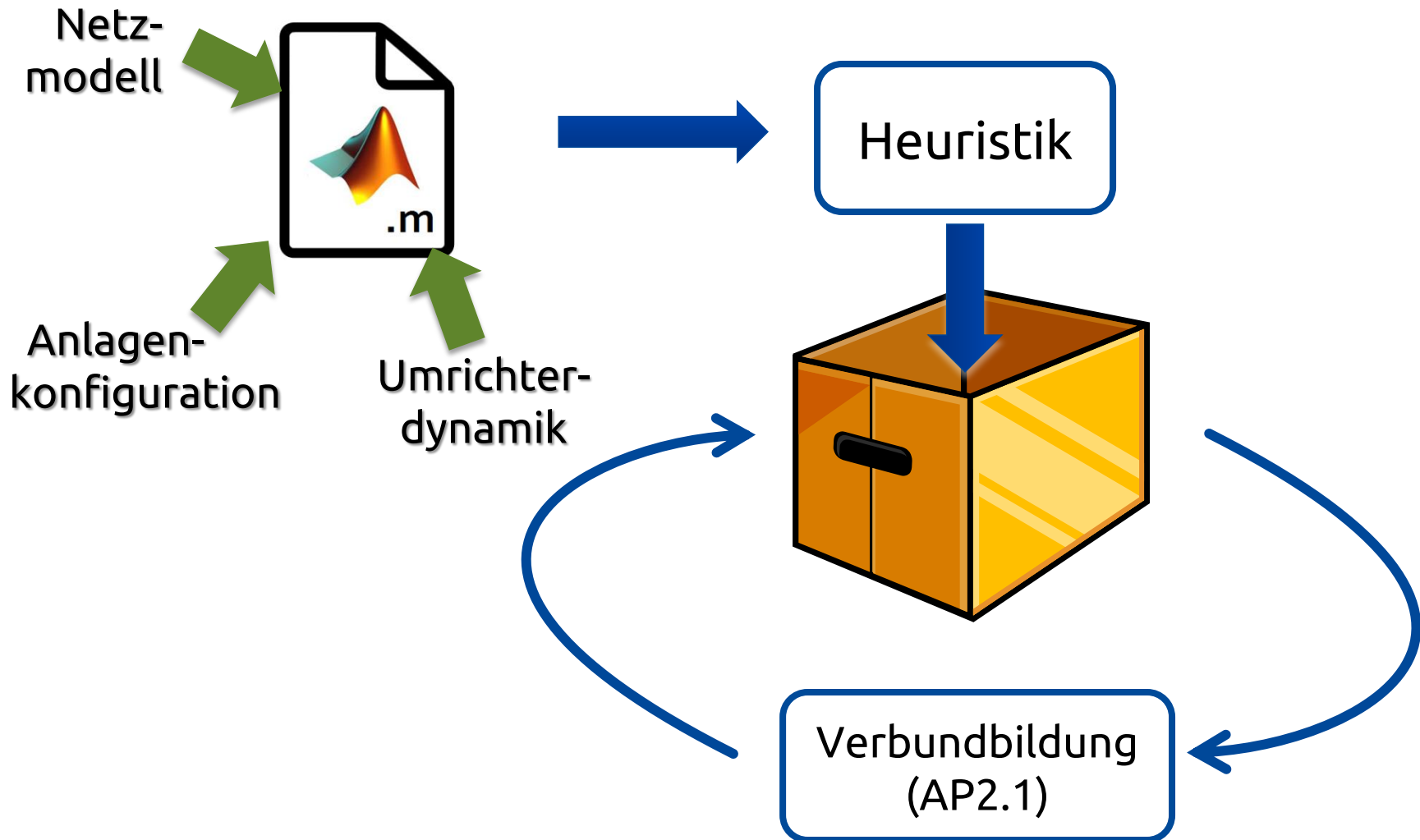
- Ein generelles nichtlineares Modell für den dynamischen Leistungsfluss in einem NS-Netz mit  $n$  verteilten Erzeugern wurde in MATLAB/Simulink realisiert.

# Ergebnis 2: Reglerauslegung

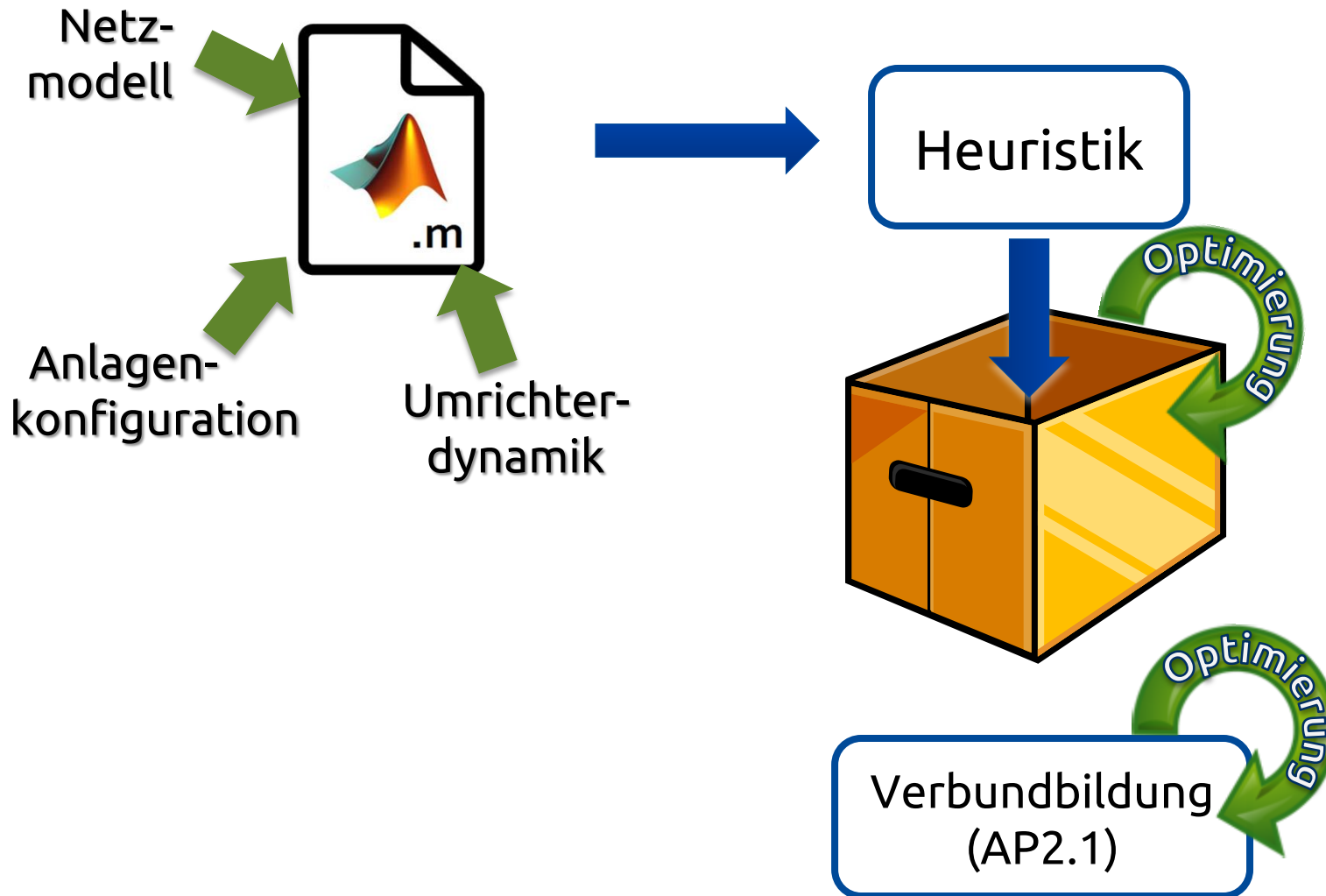
- Den Wirkleistung-Statikkennlinien der Anlagen wurde eine langsame Dynamik hinzugefügt (PDT), die die Schwingungen im Verbund dämpft. Ziel ist es, die in AP2.1 gebildeten Verbünde zu dämpfen, ohne die Statikkennlinien oder die Netzimpedanzen ändern zu müssen.
- Die validierten Modelle und entwickelten Algorithmen zur Reglerauslegung wurden in Veröffentlichungen dokumentiert.



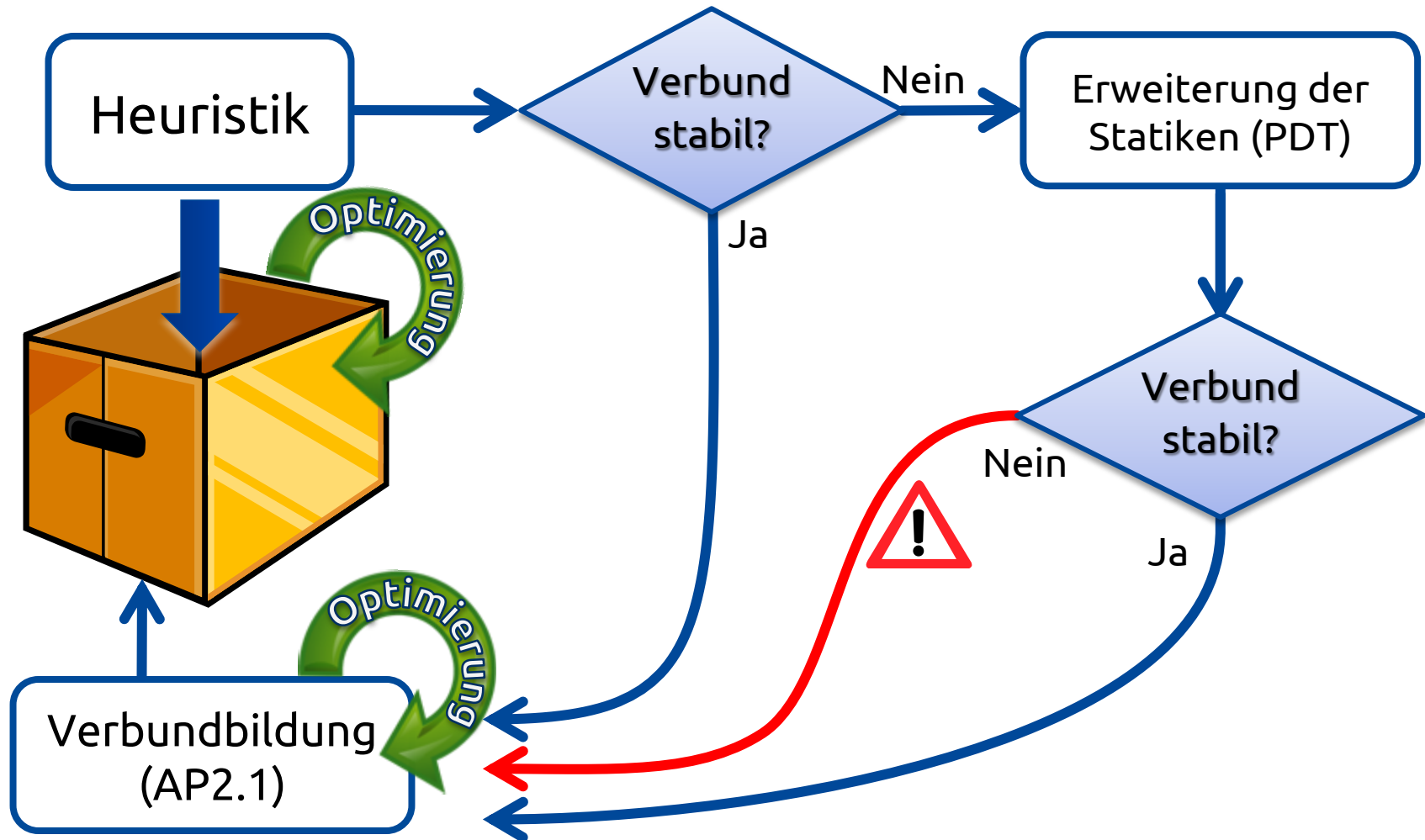
# Ergebnis 3: Integration in TP2



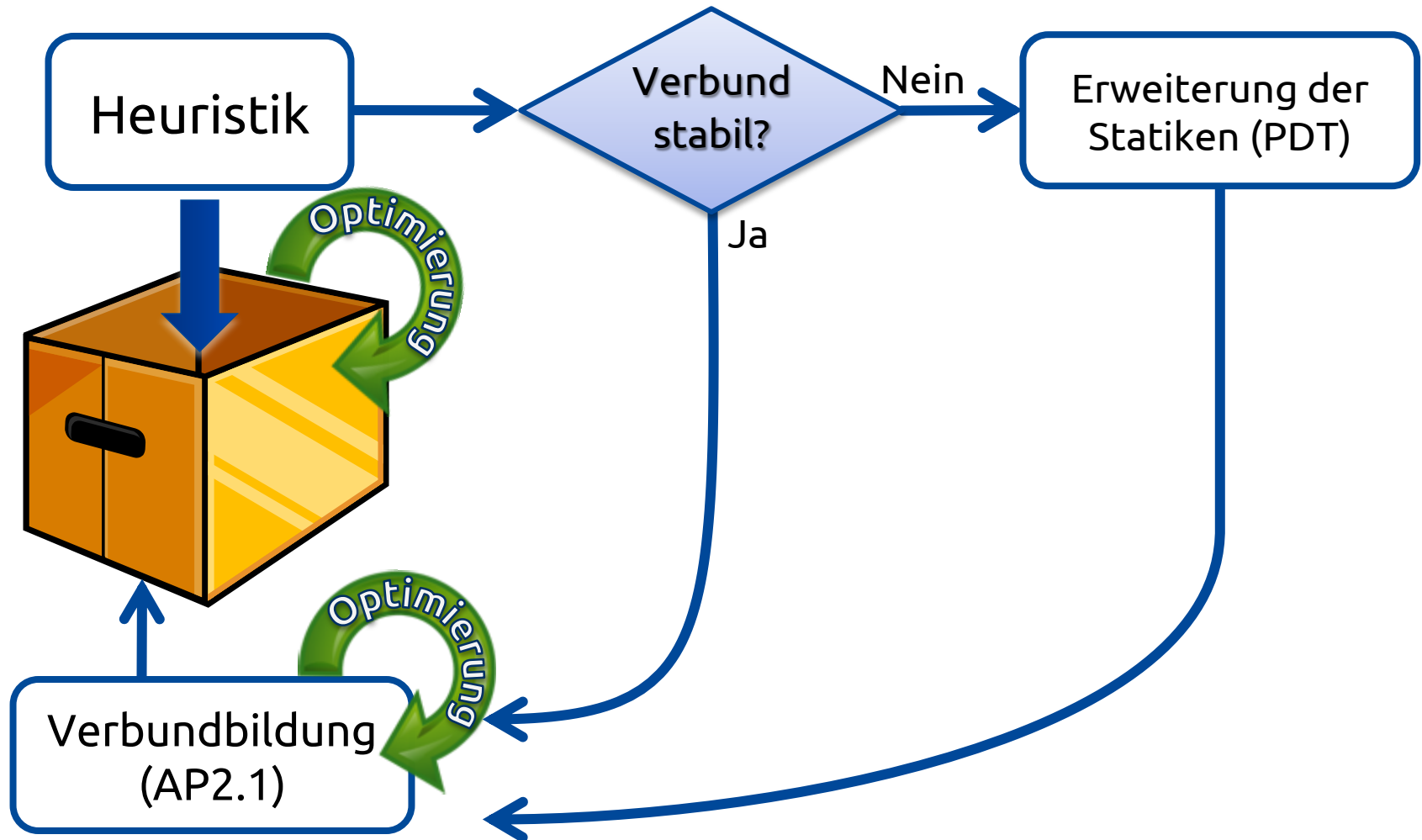
# Ergebnis 3: Integration in TP2



# Ergebnis 3: Integration in TP2

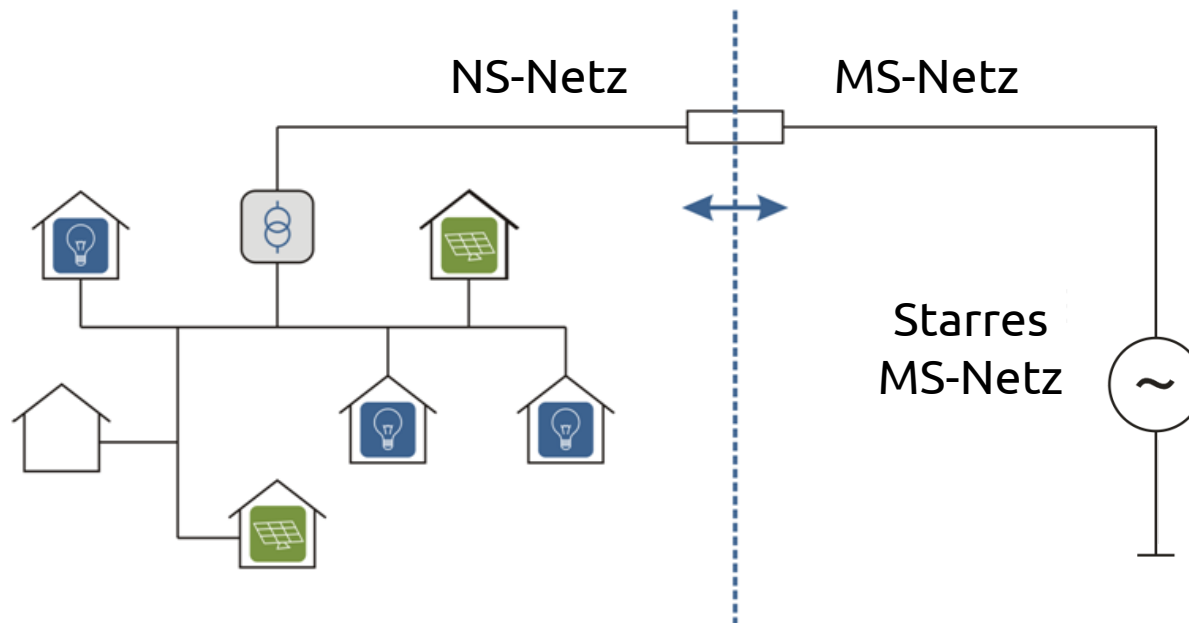


# Ergebnis 3: Integration in TP2



# Ergebnis 4: aggregiertes Modell

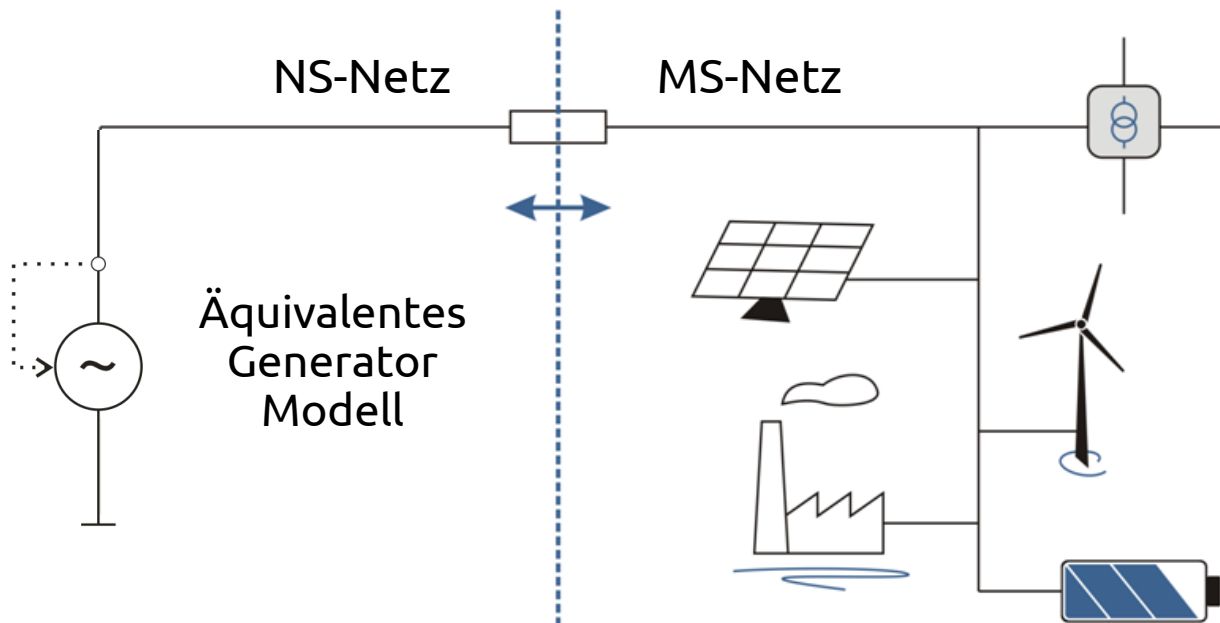
- Ein aggregiertes dynamisches Makro-Modell des NS-Netzes zur Einbindung in das europäische Modell (TP4) wurde abgeleitet



- Das Modell ist nichtlinear und bildet sowohl den stationären Leistungsfluss als auch die resultierenden Statikkennlinien und das dynamische Verhalten des Verbundes mit reduzierter Ordnung nach.

# Ergebnis 4: aggregiertes Modell

- Ein aggregiertes dynamisches Makro-Modell des NS-Netzes zur Einbindung in das europäische Modell (TP4) wurde abgeleitet



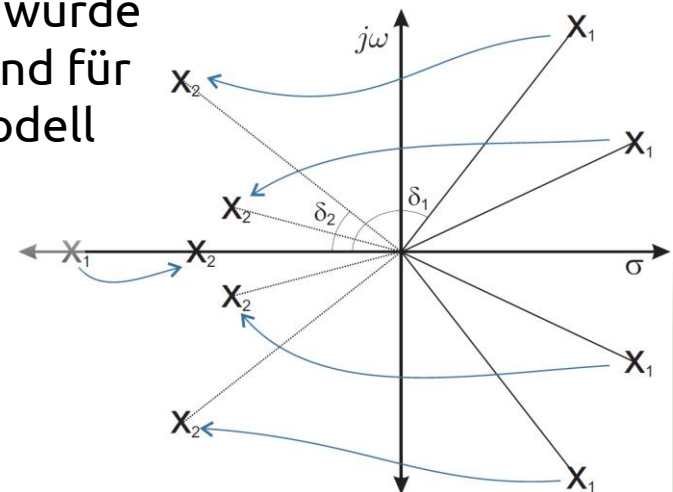
- Das Modell ist nichtlinear und bildet sowohl den stationären Leistungsfluss als auch die resultierenden Statikkennlinien und das dynamische Verhalten des Verbundes mit reduzierter Ordnung nach.



# Zusammenfassung und Ausblick

Die Stabilität von SDL Verbänden im NS-Netz wurde in vier Teilaspekten untersucht:

- Das dynamische Verhalten des Systems wurde durch ein nichtlineares Modell nachgebildet
- Die Dämpfung bzw. die Stabilität des Verbundes wurde durch die Auslegung dezentraler Regler erreicht
- Die Kleinsignalstabilität wurde ganzheitlich im TP 2 betrachtet
- Das äquivalente Verhalten des NS-Netzes wurde in Form eines Makro-Modells aggregiert und für die Einbindung in das Europäische Netzmodell bereitgestellt



# Netzstützende Systemdienstleistungen aus Gerätesicht

Arbeitspaket 2.5

René Dietz (Leibniz Universität Hannover)

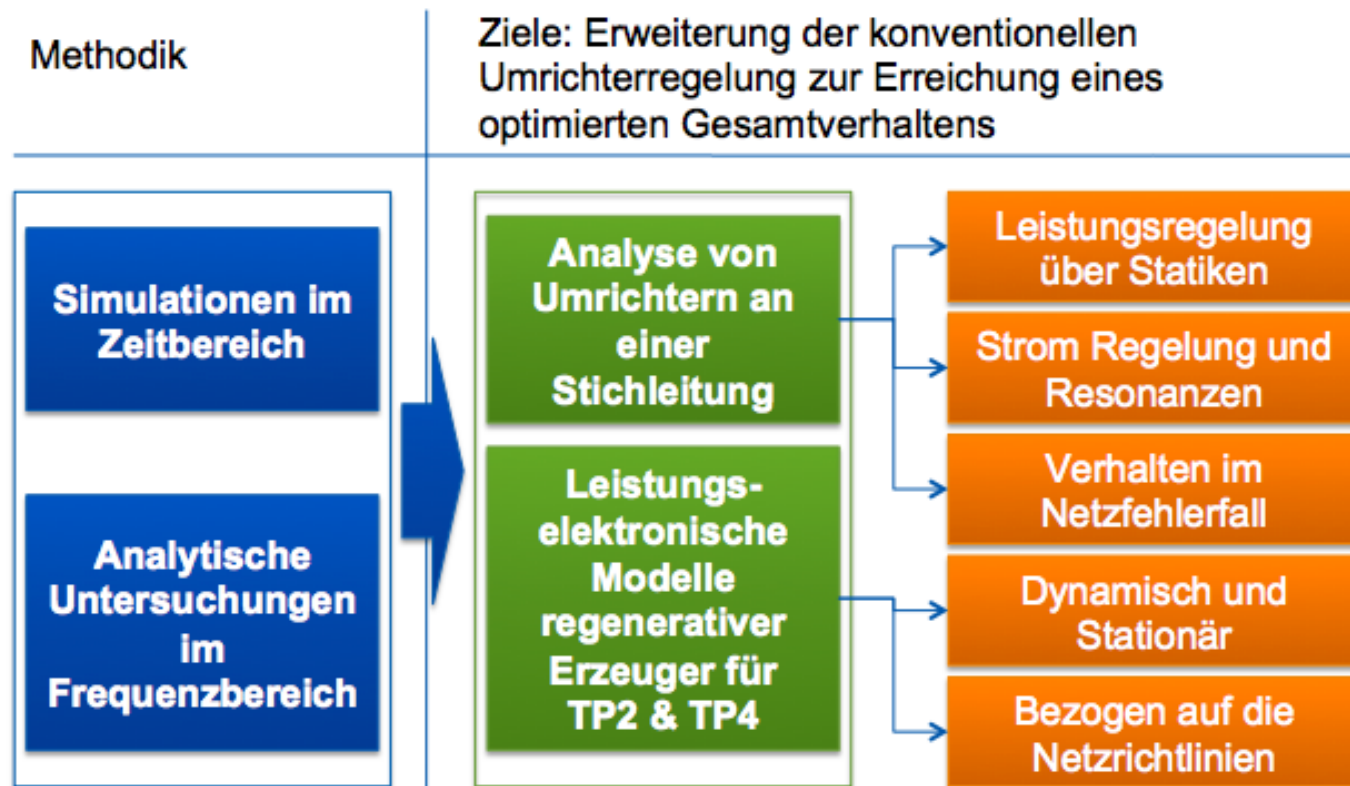
Felix Fuchs (Leibniz Universität Hannover)

Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens (Leibniz Universität Hannover)



# Fragestellung und Methodik

- Zentrale Forschungsfrage:
  - Wie können sich Umrichter/dezentrale Erzeugungsanlagen an netzstützenden Systemdienstleistungen beteiligen?

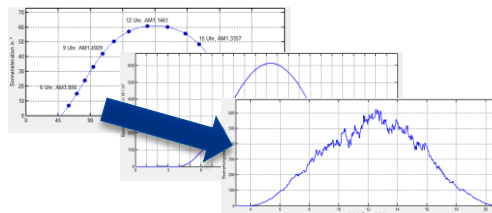


# Ergebnis 1: Modellierung von typischen dezentralen Erzeugungsanlagen

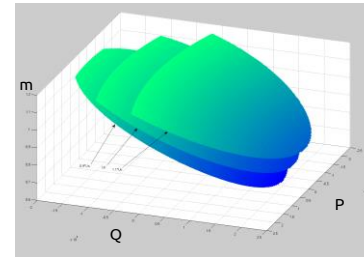
- Statische Modelle
  - Zulässige P/Q-Betriebsbereiche

- Quasi-Statische Modelle

- PV-Anlage
- WE-Anlage



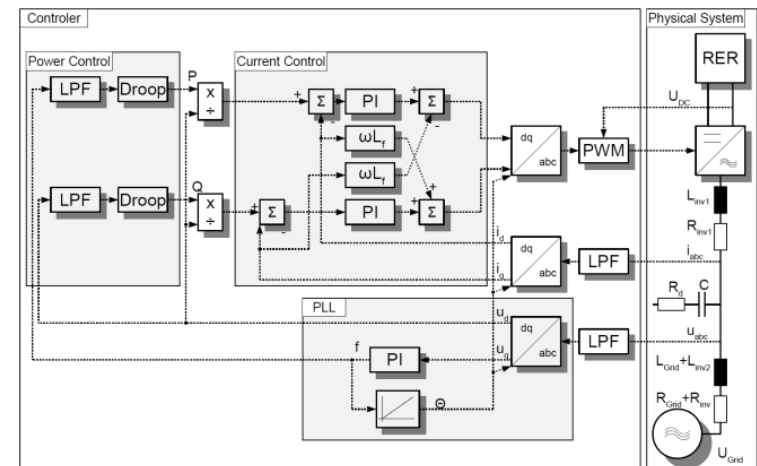
Generierte Leistungsverläufe einer PV-Anlage für die Simulation



P/Q-Betriebsbereiche eines Umrichters bei variabler Netzspannung ( $0.9 U_n, U_n, 1.1 U_n$ )

- Umrichter-Modelle mit Netzfilter und Regelung

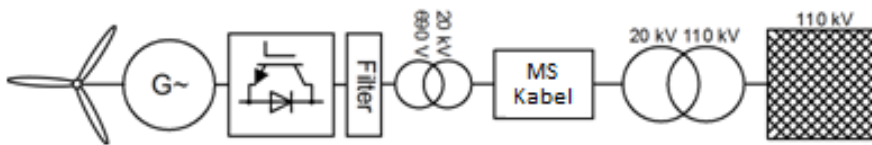
- Niederspannung (400 V-Netz):
  - 30 kW PV-Umrichter
  - Diverse Regelungsvarianten
- Mittelspannung (20 kV-Netz):
  - WEA- Umrichter in diversen Schaltungen
  - Leistungen 500 kW bis 5 MW
  - Genaue Regelungsmodellierung



Beispiel einer invers „Droop“-geregelt regenerativen Energieumwandlungsanlage

# Ergebnis 2: Untersuchung der Dynamik der Stromregelung

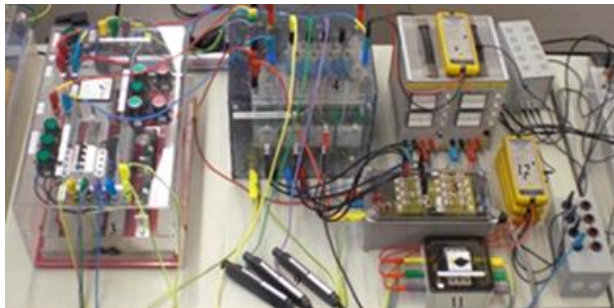
- Einfluss von Netzresonanzen durch lange Kabel
  - Theoretische Analyse des Einflusses von Netzresonanzen auf die Regelung
  - Vorhersage von Instabilitäten und geeigneter Abhilfe in der Regelung
  - Validierung mittels Simulation anhand der detaillierten Modelle (s. Ergebnis 1)
  - Labormodell im kleinen Maßstab bestätigt die Analyse und Simulation



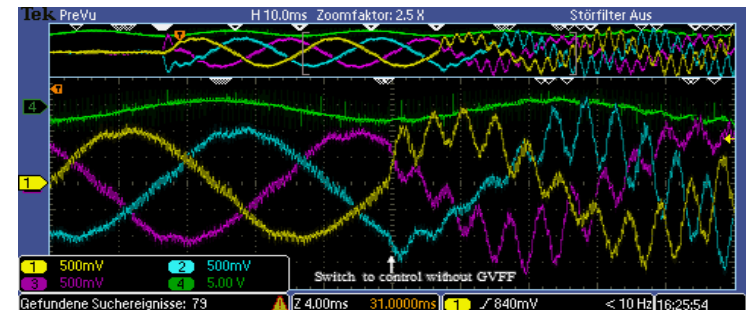
Netzanbindung einer WEA mit langem Kabel



Vereinfachter Regelkreis für die Analyse

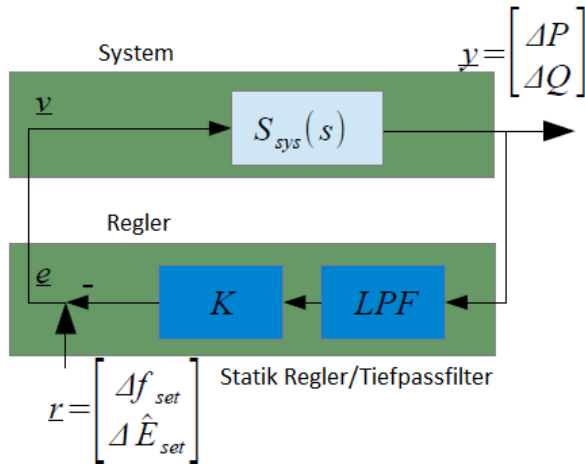


Laboraufbau mit verkleinerter Leistung

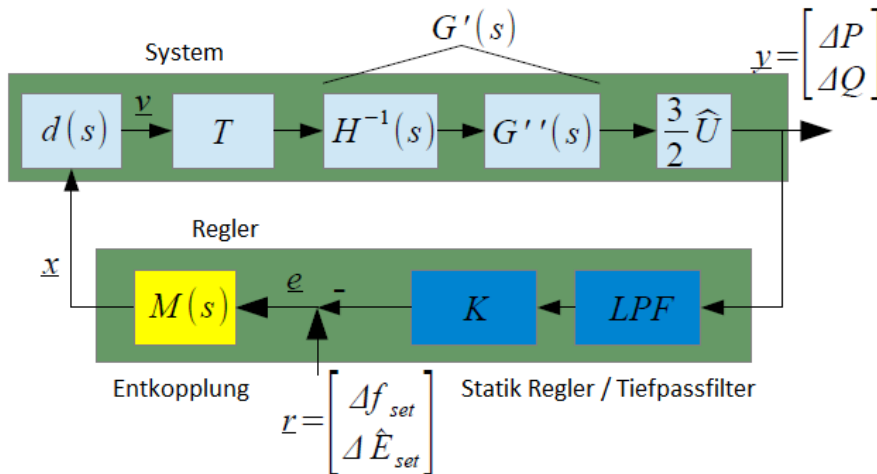
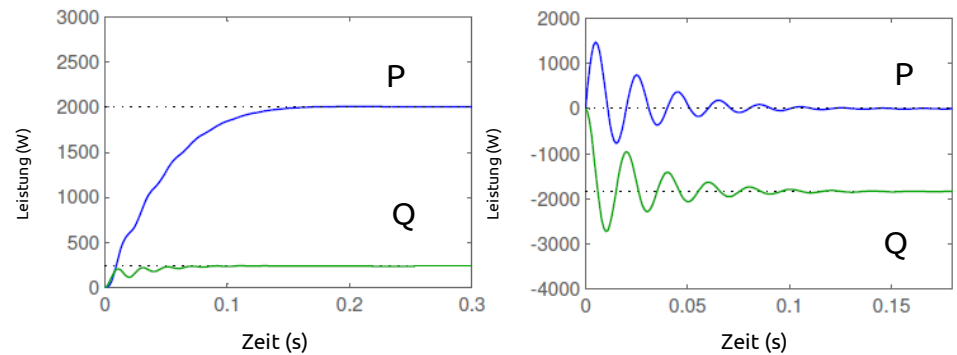


Stromverläufe im Laboraufbau; links: stabil mit Vorsteuerung, rechts: instabil ohne Vorsteuerung

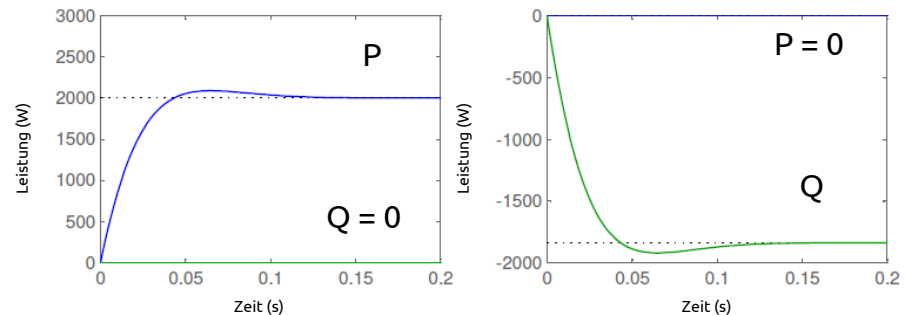
# Ergebnis 3: Untersuchung der Leistungsregelung über P/Q-Statiken



Sprungantworten P, Q (konventionelle Statikregelung)

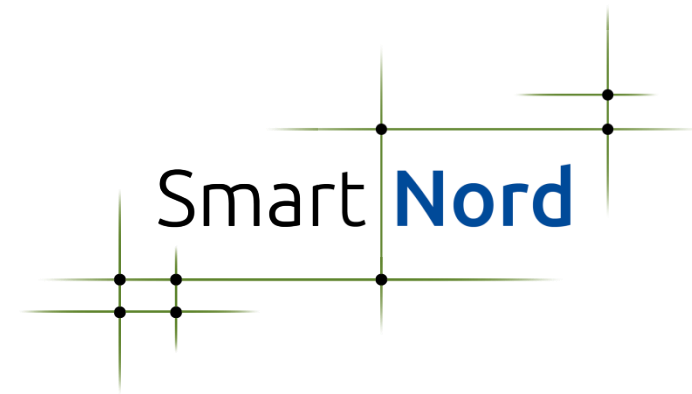
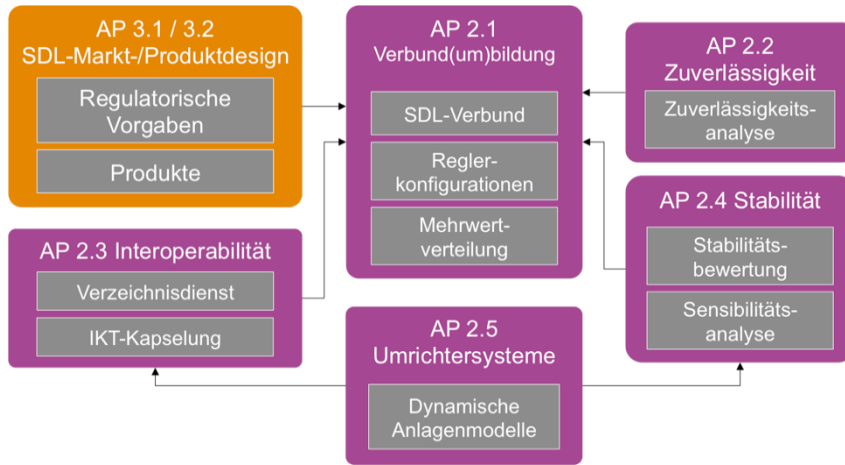


Sprungantworten P, Q (entkoppelte Statikregelung)



# Zusammenfassung und Ausblick

- Statische Modelle von Umrichtern für realistische Betriebsgrenzen (P,Q)
- Quasi-statische Modelle der regenerativen Energiequellen (Solar, Wind)
- Detaillierte dynamische Modelle von Umrichtern einschließlich der Regelung und der Netzanbindung
  - Verifikation der gröberen Modelle in anderen Arbeitspaketen
  - Basis für genaue Untersuchung der Regelungen
- Entwurf und Untersuchungen zur Dynamik der Stromregelung von WEA
  - Einfluss von Resonanzen auf die Stromregelung
  - Analyse und Validierung in Theorie und Praxis
- Entkopplung/Optimierung der Leitungsregelung
  - Erweiterung der konventionellen Statik-Regelung um eine Entkopplungsmatrix
  - Deutlich verbesserte Entkopplung von Wirk- und Blindleistungsregelung
- Experimentelle Validierung im Rahmen der Promotionen der zwei Bearbeiter

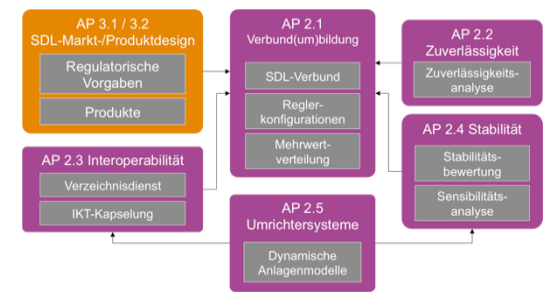


# Teilprojekt 2

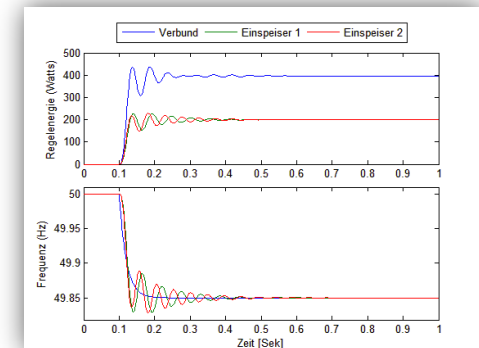
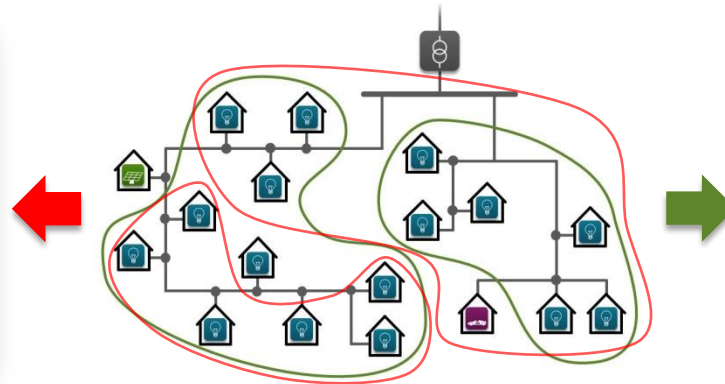
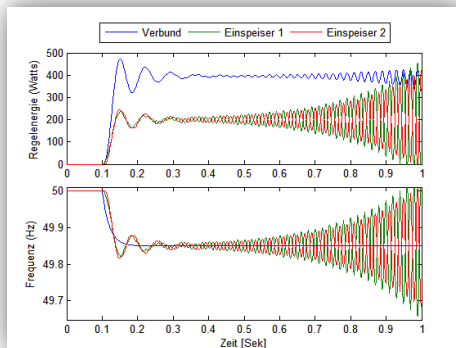
## Zusammenfassung und Ausblick



# Zusammenfassung

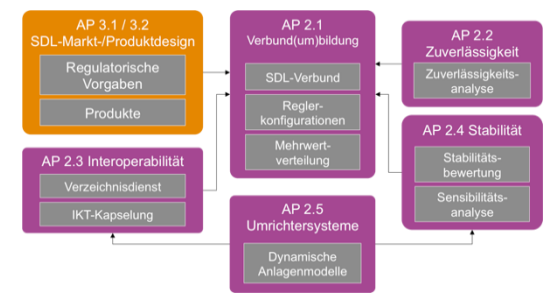


- Integriertes IKT-, regelungs- und leistungselektronisches Modell zur Bewertung der Dynamik wirtschaftlich optimierter, zuverlässiger SDL-Verbünde

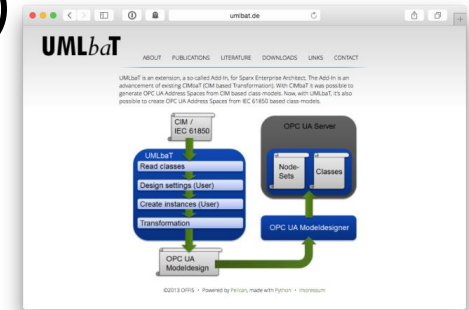


- 15 Konferenz- und Journalpublikationen
- Gemeinsame *disziplinübergreifende* Publikationen!

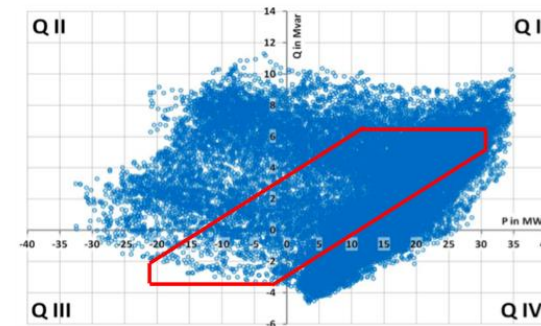
# Offene Fragen und Ausblick

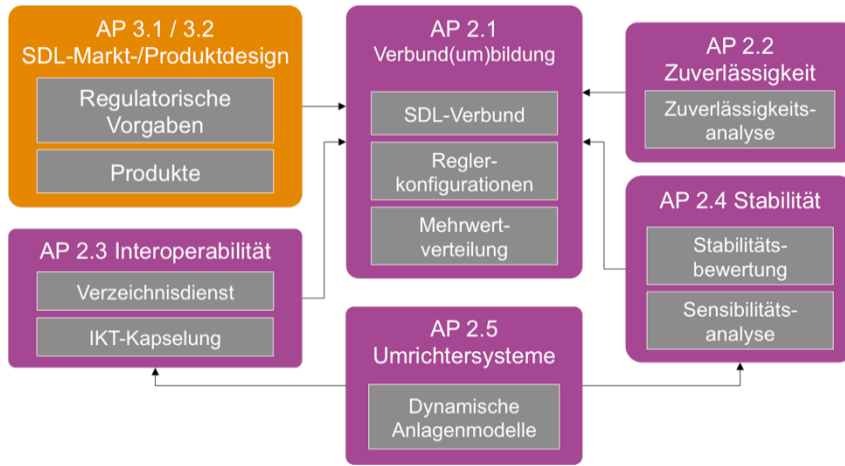


- Entwicklung von Werkzeugen zu nachhaltigen Nutzung über Smart Nord hinaus ([www.umlbat.de](http://www.umlbat.de))



- Offene Frage: wie beeinflussen sich Wirk- und Blindleistungsregelungen auf gemeinsamen Anlagen?
- Transferprojekt: **iQ-Regler**





Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!