

---

# Moderne Optimierungsverfahren zum Betrieb von Windparkclustern in Norddeutschland

14. Symposium Energieinnovation, 10.-12.02.2016, Graz/Austria

Sebastian Stock, M.Sc, Fraunhofer IWES

---

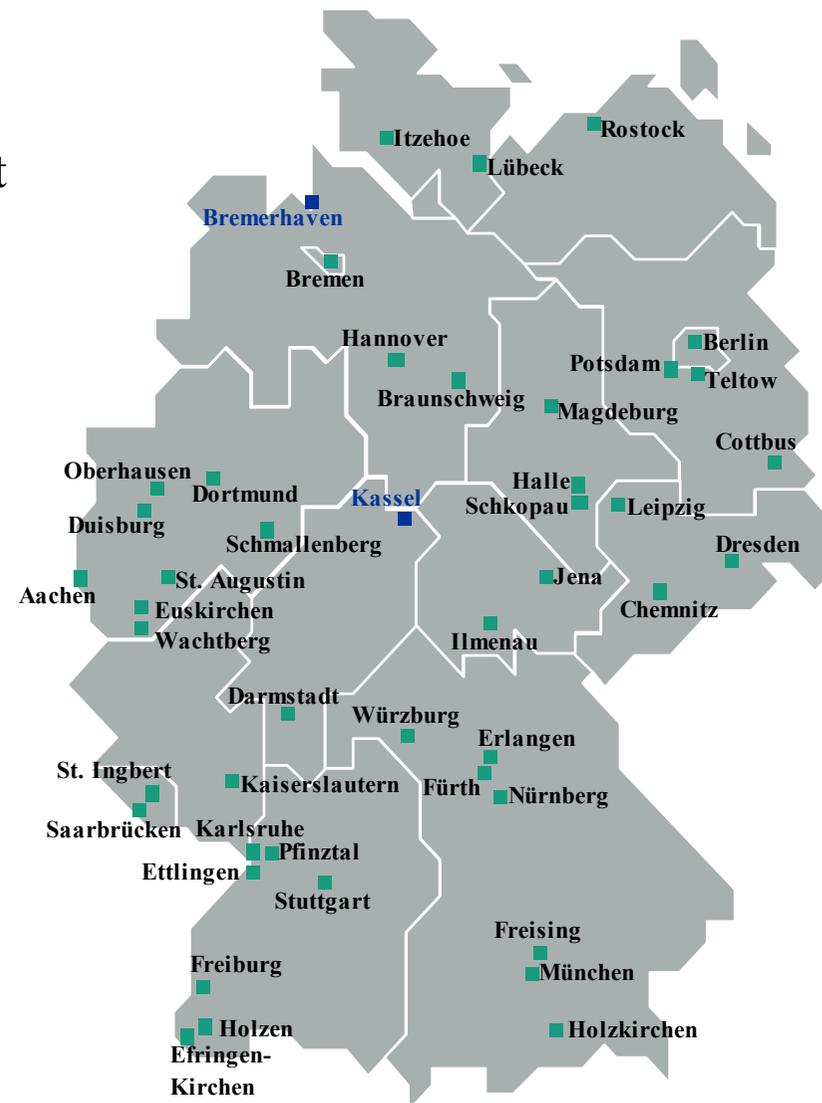


# Die Fraunhofer-Gesellschaft und das Fraunhofer IWES

Fraunhofer-Gesellschaft: wurde **1949** gegründet und ist heute die größte Organisation für angewandte Forschung in Europa mit mehr als **80** Forschungs-einrichtungen allein in Deutschland

Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES)

- Zwei Standorte: Bremerhaven mit Schwerpunkt Windenergie und **Kassel** mit Schwerpunkt Energiesystemtechnik
- Jahresbudget: rund 32 Mio. Euro
- Personal: ca. 480 Personen
- Leitung: Prof. Dr. Andreas Reuter, Prof. Dr. Clemens Hoffmann



# Übersicht

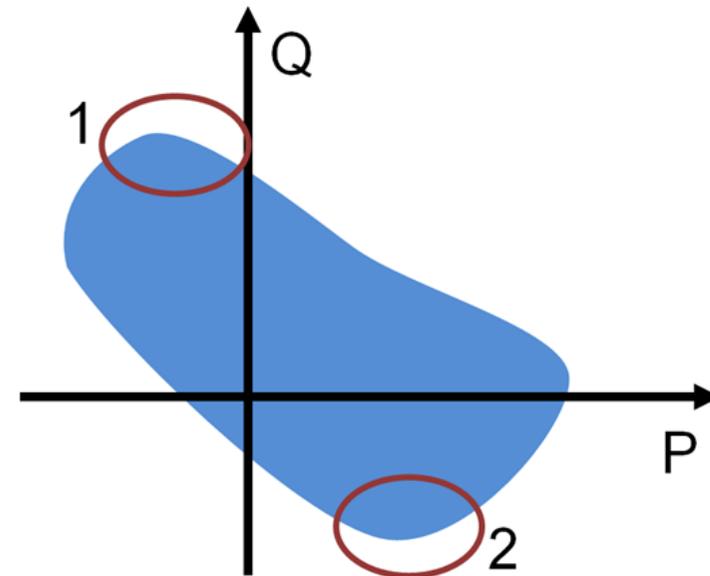
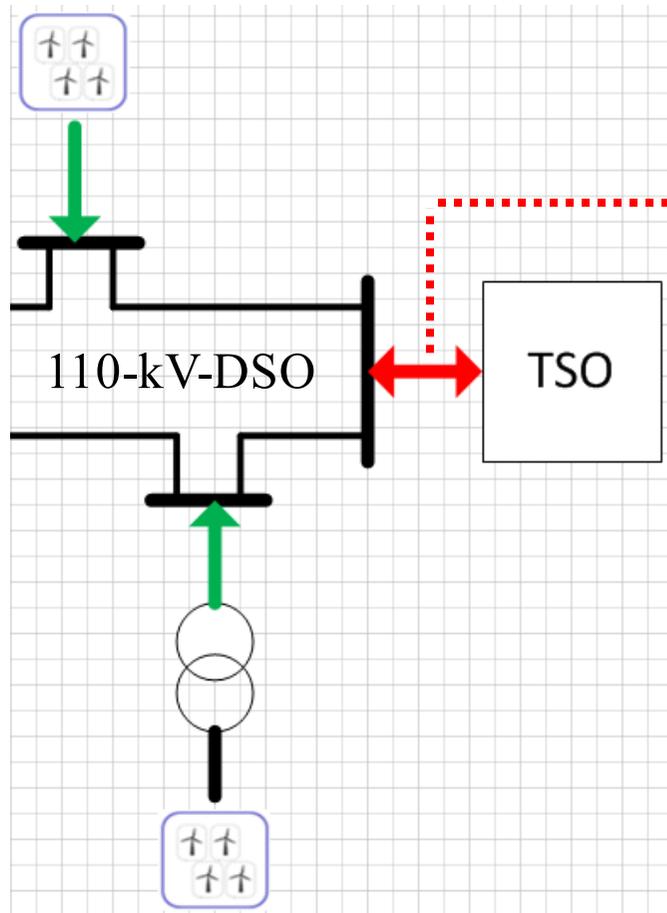
1. Hintergrund und Problemstellung
  1. Was ist ein Windparkcluster?
  2. Was kann ich damit machen?
2. Projektrahmen und Methodik
  1. Das BMWi-Projekt „IMOWEN“
  2. Das WCMS und das Optimierungstool GAMS-OPF
3. Simulationsergebnisse
  1. Modellierung
  2. Simulation
4. Ausblick

# Übersicht

1. Hintergrund und Problemstellung
  1. Was ist ein Windparkcluster?
  2. Was soll damit hier gemacht werden?
2. Projektrahmen und Methodik
  1. Das BMWi-Projekt „IMOWEN“
  2. Das WCMS und das Optimierungstool GAMS-OPF
3. Simulationsergebnisse
  1. Modellierung
  2. Simulation
4. Ausblick



## 1.2 :: Was soll damit hier gemacht werden?



**Blindleistungsmanagement**

# Übersicht

1. Hintergrund und Problemstellung
  1. Was ist ein Windparkcluster?
  2. Was kann ich damit machen?
2. Projektrahmen und Methodik
  1. Das BMWi-Projekt „IMOWEN“
  2. Das WCMS und das Optimierungstool GAMS-OPF
3. Simulationsergebnisse
  1. Modellierung
  2. Simulation
4. Ausblick

## 2.1 :: Das BMWi-Projekt „IMOWEN“ (1)

IMOWEN:

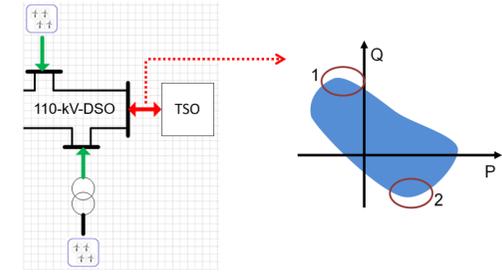
Integration großer **M**engen **O**n- und Offshore erzeugter **W**indenergie in  
das **e**lektrische **N**etz durch intelligente Netzanalyse und  
Clusterbetriebsführung

**STROMNETZE**

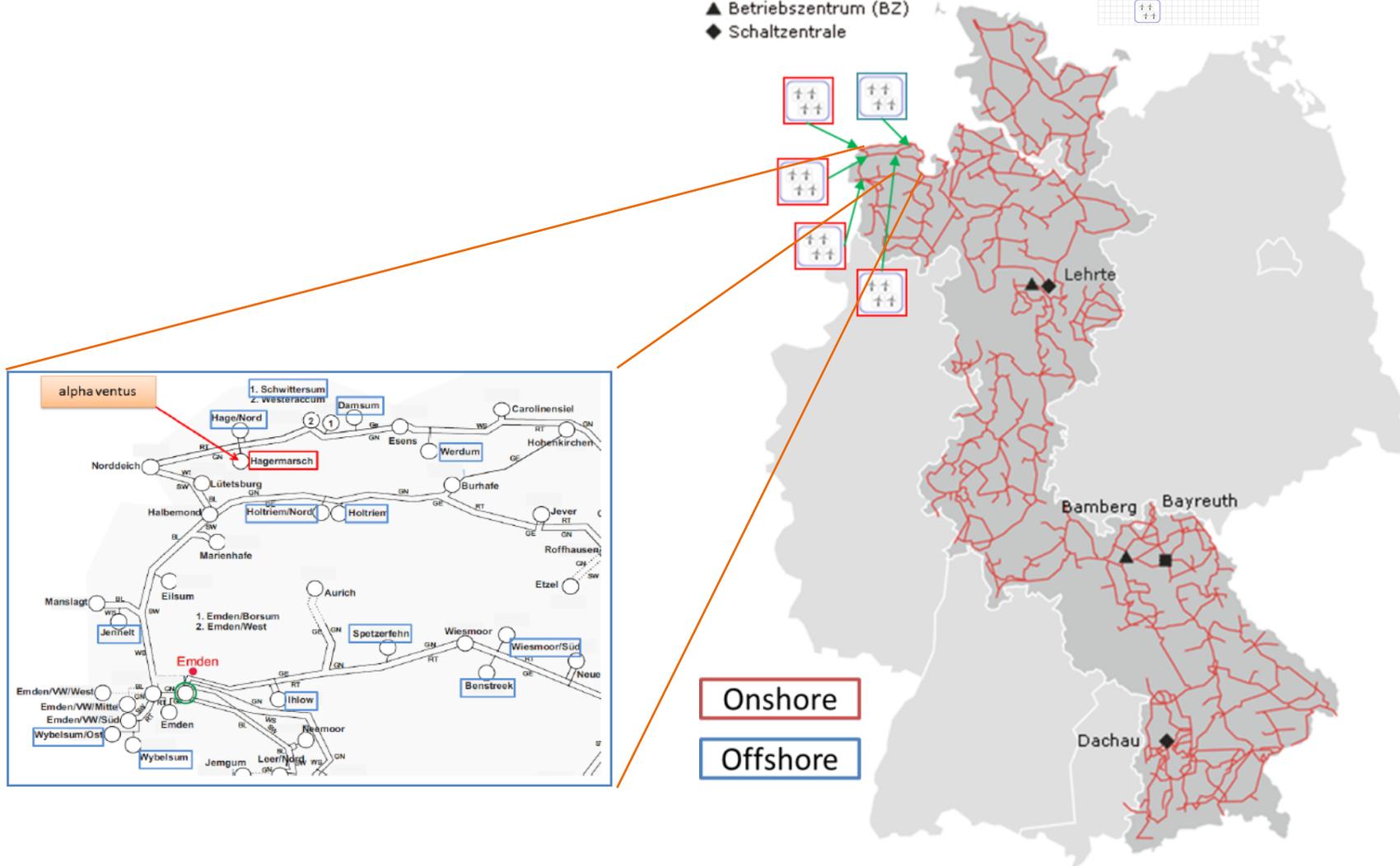
Forschungsinitiative der Bundesregierung

<http://forschung-stromnetze.info/projekte/windpark-cluster-sicher-ins-netz-integrieren>

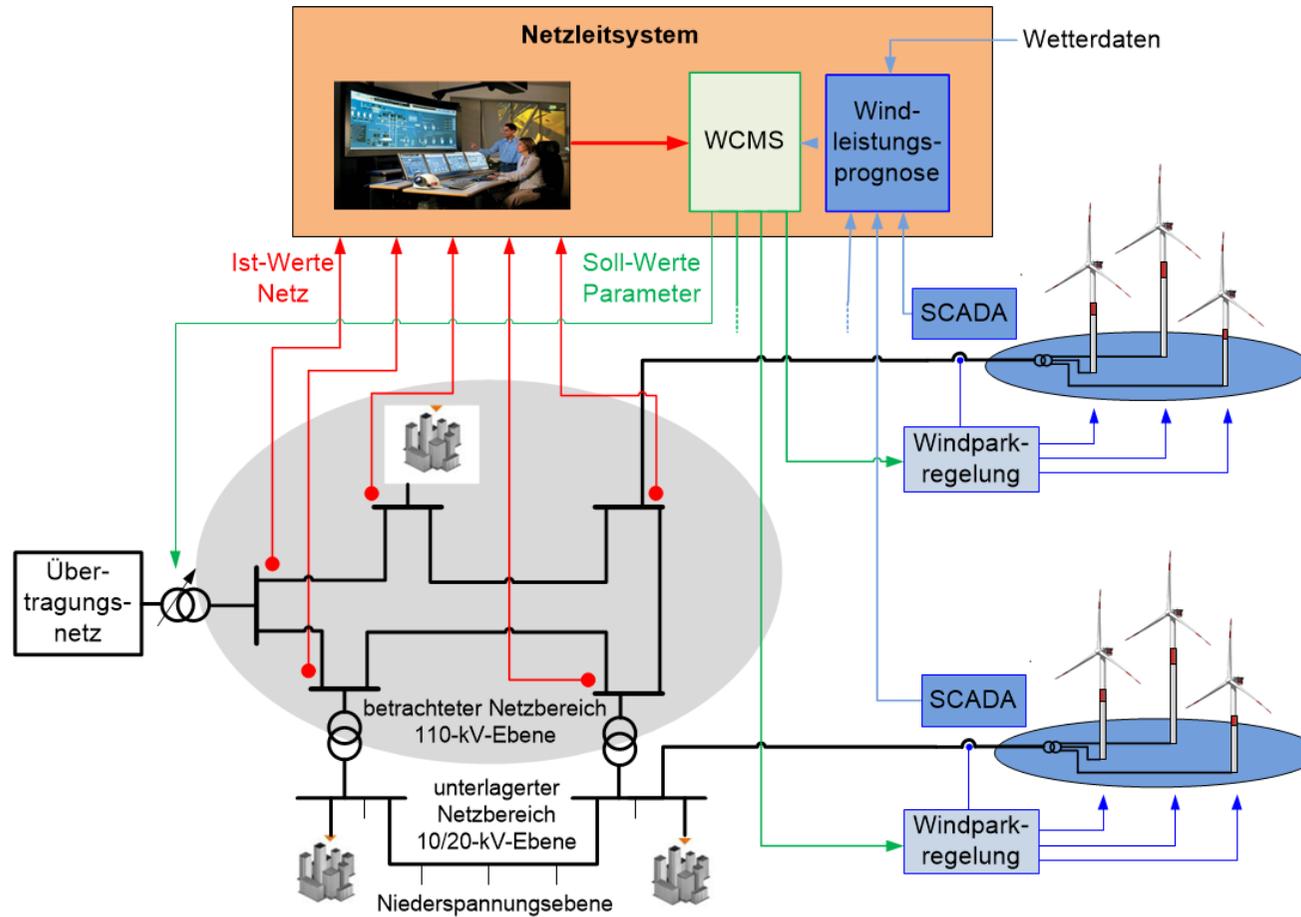
# 2.1 :: Das BMWi-Projekt „IMOWEN“ (2)



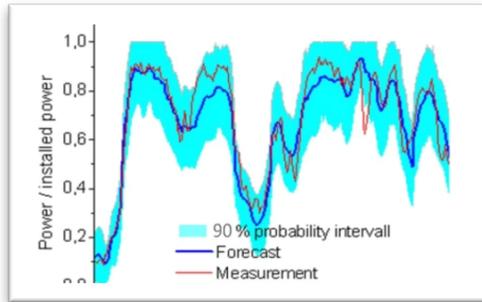
- Unternehmensleitung
- ▲ Betriebszentrum (BZ)
- ◆ Schaltzentrale



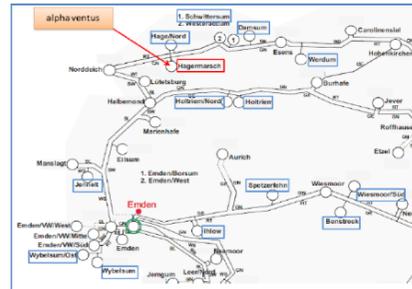
## 2.2 :: Das WCMS (1) und das Optimierungstool GAMS-OPF



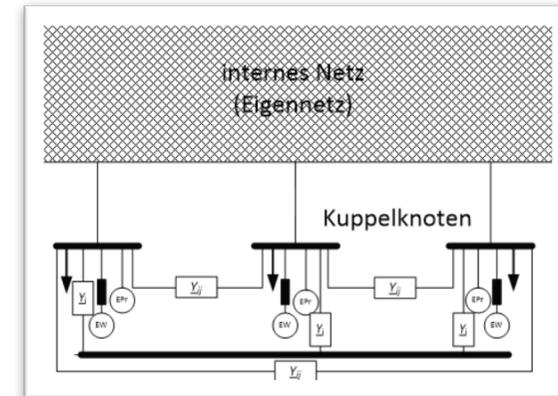
## 2.2 :: Das WCMS (2) und das Optimierungstool GAMS-OPF



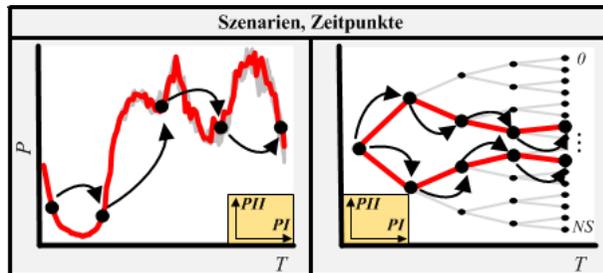
Windprognosen



Topologieinformationen



Extended Ward  
Randnetznachbildung



Szenarien und IST-Zustände

(1) Fuel cost minimization

$$\text{Min } F_g = \sum_{i=1}^{NG} (a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i)$$

(2) VAR planning

$$\text{Min } F_q = \sum_{i=1}^{Nc} S_{ci} (q_{ci}^{\text{tot}} - q_{ci}^{\text{exist}}) - \sum_{i=1}^{Nr} S_{ri} (q_{ri}^{\text{tot}} - q_{ri}^{\text{exist}}) + S_{\omega} P_L$$

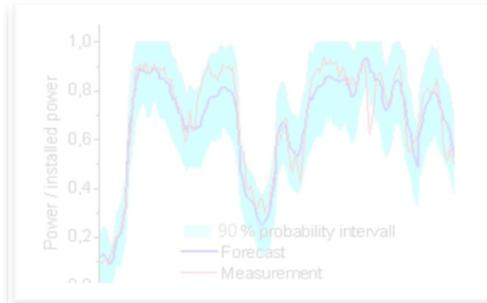
(3) Loss minimization

$$\text{min } P_L = F(P_{\text{gslack}})$$

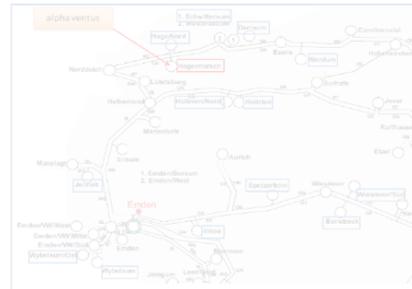
**Optimierungsverfahren**

**WCMS**

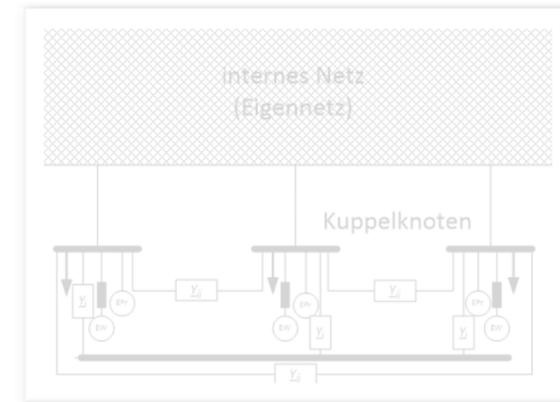
## 2.2 :: Das WCMS (2) und das Optimierungstool GAMS-OPF



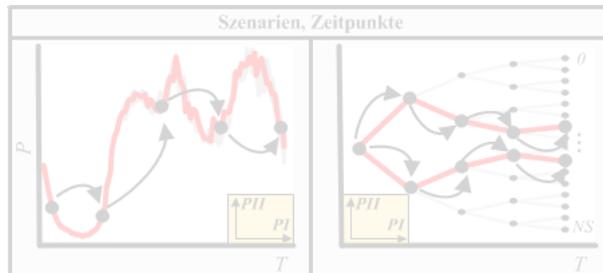
Windprognosen



Topologieinformationen



Extended Ward  
Randnetznachbildung



Szenarien und IST-Zustände

(1) Fuel cost minimization

$$\text{Min } F_g = \sum_{i=1}^{NG} (a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i)$$

(2) VAR planning

$$\text{Min } F_q = \sum_{i=1}^{Nc} S_{ci} (q_{ci}^{\text{tot}} - q_{ci}^{\text{exist}}) - \sum_{i=1}^{Nr} S_{ri} (q_{ri}^{\text{tot}} - q_{ri}^{\text{exist}}) + S_{\omega} P_L$$

(3) Loss minimization

$$\text{min } P_L = F(P_{\text{gslack}})$$

Optimierungsverfahren

WCMS

## 2.2 :: Das WCMS und das Optimierungstool GAMS-OPF (1)

unter den Nebenbedingungen:

$$\min_u f(u)$$
$$G(x, u, y) = 0$$
$$H(x, u, y) \geq 0$$

mit:

- $f(u)$  : Zielfunktion  
 $G$  : Gleichheitsnebenbedingungen  
 $H$  : Ungleichheitsnebenbedingungen  
 $x$  : Zustandsgrößen  
 $u$  : Stellgrößen  
 $y$  : Parameter



## 2.2 :: Das WCMS und das Optimierungstool GAMS-OPF (1)

unter den Nebenbedingungen:

$$\min_u f(u)$$

$$\underline{G(x, u, y) = 0}$$

$$H(x, u, y) \geq 0$$

mit:

$f(u)$  : Zielfunktion

$G$  : Gleichheitsnebenbedingungen

$H$  : Ungleichheitsnebenbedingungen

$x$  : Zustandsgrößen

$u$  : Stellgrößen

$y$  : Parameter

Netzverluste, Systemeingriffe, Andere Systemgrößen (Blindleistungsbilanz)

Leistungsflussgleichungen  
(exakt einzuhalten)

Systemgrenzen  
(„kleiner/ gleich einer Grenze“)

Spannungsbeträge und –winkel an jedem Knoten

Wirk- und Blindleistungsabgabe der Erzeugungsanlagen, Position der Transformatorstufensteller

Netzwerktopologie, Netzwerkparameter R,X,B, Strombelastbarkeiten, Spannungsgrenzen

## 2.2 :: Das WCMS und das Optimierungstool GAMS-OPF (1)

unter den Nebenbedingungen:

$$\min_u f(u)$$

$$G(x, u, y) = 0$$

$$\underline{H(x, u, y) \geq 0}$$

mit:

$f(u)$  : Zielfunktion

$G$  : Gleichheitsnebenbedingungen

$H$  : Ungleichheitsnebenbedingungen

$x$  : Zustandsgrößen

$u$  : Stellgrößen

$y$  : Parameter

Netzverluste, Systemeingriffe, Andere Systemgrößen (Blindleistungsbilanz)

Leistungsflussgleichungen  
(exakt einzuhalten)

**Systemgrenzen**  
(„kleiner/ gleich einer Grenze“)

Spannungsbeträge und –winkel an jedem Knoten

Wirk- und Blindleistungsabgabe der Erzeugungsanlagen, Position der Transformatorstufensteller

Netzwerktopologie, Netzwerkparameter R,X,B, Strombelastbarkeiten, Spannungsgrenzen

## 2.2 :: Das WCMS und das Optimierungstool GAMS-OPF (1)

unter den Nebenbedingungen:

$$\min_u f(u)$$

$$G(x, u, y) = 0$$

$$H(x, u, y) \geq 0$$

mit:

$f(u)$  : Zielfunktion

$G$  : Gleichheitsnebenbedingungen

$H$  : Ungleichheitsnebenbedingungen

$x$  : Zustandsgrößen

$u$  : Stellgrößen

$y$  : Parameter

Netzverluste, Systemeingriffe, Andere Systemgrößen (Blindleistungsbilanz)

Leistungsflussgleichungen (exakt einzuhalten)

Systemgrenzen („kleiner/ gleich einer Grenze“)

Spannungsbeträge und –winkel an jedem Knoten

Wirk- und Blindleistungsabgabe der Erzeugungsanlagen, Position der Transformatorstufensteller

Netzwerktopologie, Netzwerkparameter R,X,B, Strombelastbarkeiten, Spannungsgrenzen

## 2.2 :: Das WCMS und das Optimierungstool GAMS-OPF (1)

unter den Nebenbedingungen:

$$\min_u f(u)$$
$$G(x, u, y) = 0$$
$$H(x, u, y) \geq 0$$

mit:

- $f(u)$  : Zielfunktion  
 $G$  : Gleichheitsnebenbedingungen  
 $H$  : Ungleichheitsnebenbedingungen  
 $x$  : Zustandsgrößen  
 $u$  : Stellgrößen  
 $y$  : Parameter

Netzverluste, Systemeingriffe, Andere Systemgrößen (Blindleistungsbilanz)

Leistungsflussgleichungen (exakt einzuhalten)

Systemgrenzen („kleiner/ gleich einer Grenze“)

Spannungsbeträge und –winkel an jedem Knoten

Wirk- und Blindleistungsabgabe der Erzeugungsanlagen, Position der Transformatorstufensteller

Netzwerktopologie, Netzwerkparameter R,X,B, Strombelastbarkeiten, Spannungsgrenzen

## 2.2 :: Das WCMS und das Optimierungstool GAMS-OPF (1)

unter den Nebenbedingungen:

$$\min_u f(u)$$
$$G(x, u, y) = 0$$
$$H(x, u, y) \geq 0$$

mit:

- $f(u)$  : Zielfunktion  
 $G$  : Gleichheitsnebenbedingungen  
 $H$  : Ungleichheitsnebenbedingungen  
 $x$  : Zustandsgrößen  
 $u$  : Stellgrößen  
 $y$  : Parameter

Netzverluste, Systemeingriffe, Andere Systemgrößen (Blindleistungsbilanz)

Leistungsflussgleichungen (exakt einzuhalten)

Systemgrenzen („kleiner/ gleich einer Grenze“)

Spannungsbeträge und –winkel an jedem Knoten

Wirk- und Blindleistungsabgabe der Erzeugungsanlagen, Position der Transformatorstufensteller

Netzwerktopologie, Netzwerkparameter R,X,B, Strombelastbarkeiten, Spannungsgrenzen

## 2.2 :: Das WCMS und das Optimierungstool GAMS-OPF (1)

unter den Nebenbedingungen:

$$\min_u f(u)$$

$$G(x, u, y) = 0$$

$$H(x, u, y) \geq 0$$

mit:

$f(u)$  : Zielfunktion

$G$  : Gleichheitsnebenbedingungen

$H$  : Ungleichheitsnebenbedingungen

$x$  : Zustandsgrößen

$u$  : Stellgrößen

$y$  : Parameter

Netzverluste, Systemeingriffe, Andere Systemgrößen (Blindleistungsbilanz)

Leistungsflussgleichungen (exakt einzuhalten)

Systemgrenzen („kleiner/ gleich einer Grenze“)

Spannungsbeträge und –winkel an jedem Knoten

Wirk- und Blindleistungsabgabe der Erzeugungsanlagen, Position der Transformatorstufensteller

Netzwerktopologie, Netzwerkparameter R,X,B, Strombelastbarkeiten, Spannungsgrenzen

## 2.2 :: Das WCMS und das Optimierungstool GAMS-OPF (2)

$$\min_{x_H} C_H = \sum_{s=1}^{n_s} \sum_{t=0}^T \pi^{s,t} \times$$

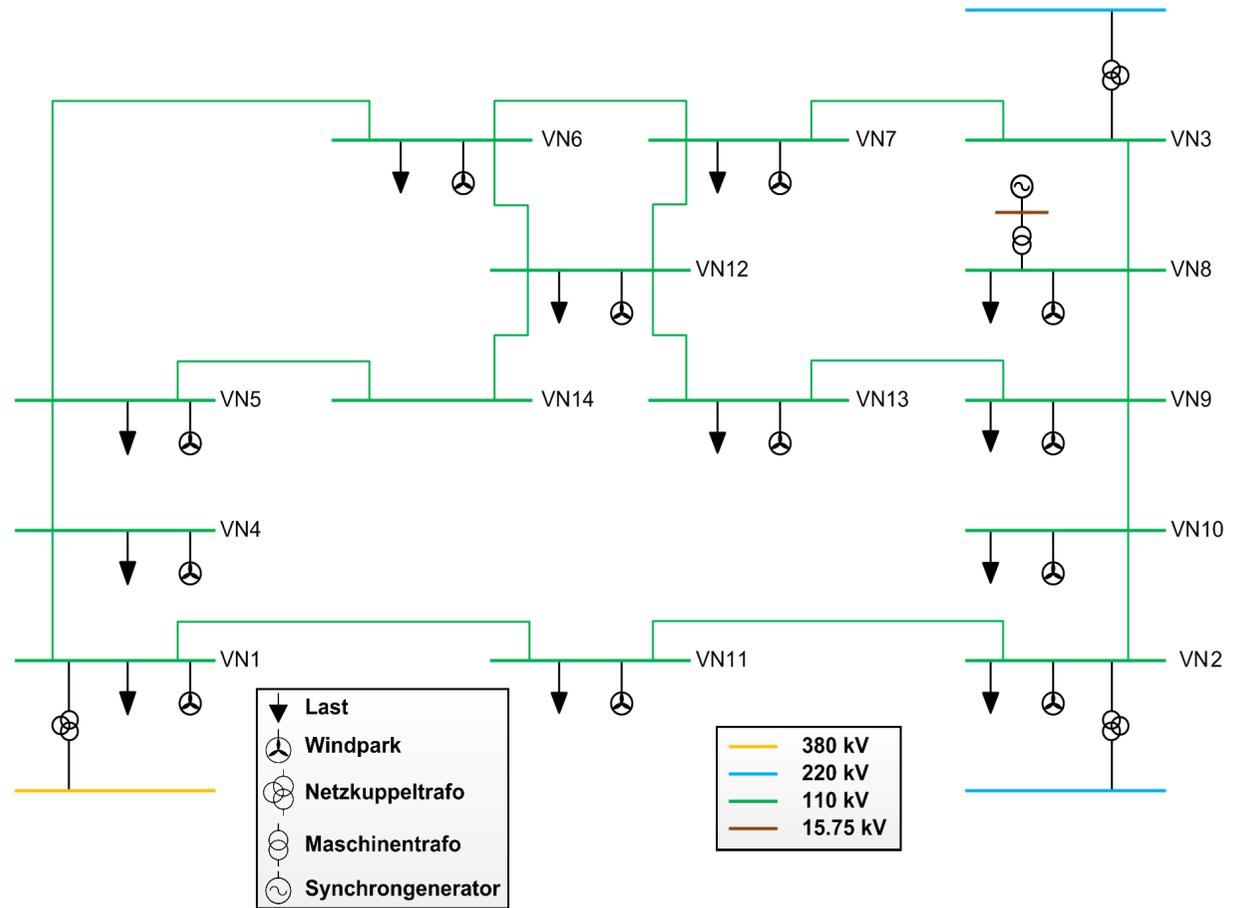
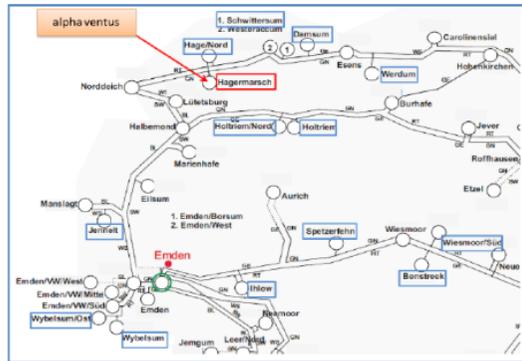
mit den individuellen Wichtungen  $\omega \in \mathfrak{R}^1$  sowie den Wahrscheinlichkeiten  $\pi^{s,t}$ , minimiere über Zeitpunkte  $t$  sowie betrachtete Szenarien  $s$  die...

$\omega_{P_{Dispatch}}$	$\times$	$\sum_{GEN} C_{Dispatch} \times  P_{Dispatch}^{s,t} $	+	→ Summe der Einspeisekosten
$\omega_{P_V}$	$\times$	$P_V^{s,t}$	+	→ Netzverluste
$\omega_{Q_{DSO}}$	$\times$	$\sum_{DSO}  Q_{DSO}^{s,t} $	+	→ Summe des Betrags der Blindleistung an betrachteten Knoten
$\omega_{Q_{Dispatch}}$	$\times$	$\sum_{GEN}  Q_{Dispatch}^{s,t} $	+	→ Summe des Betrags der bereitgestellten Blindleistung durch Generatoren
$\omega_{U_{dev}}$	$\times$	$\sum_K  U_{dev}^{s,t} $	+	→ Summe der Betragsabweichungen der Knotenspannungen von Bemessungswerten
$\omega_{Q_{minmax}}$	$\times$	$\sum_{QMINMAX}  Q_{minmax}^{s,t} $	+	→ Summe der Betrags der zu minimierenden/maximierenden Blindleistung an betrachteten Knoten
$\omega_{tap_{dev}}$	$\times$	$\sum_{OLTC}  tap_{dev}^{s,t} $	+	→ Summe der Abweichungen der Trafo – Stufenstellungen von mittleren Werten
$\omega_{tap_{act}}$	$\times$	$\sum_{OLTC}  tap_{act}^{s,t} $	+	→ Summe der Abweichungen der Trafo – Stufenstellungen von aktuellen Werten
$\omega_{shunt_{dev}}$	$\times$	$\sum_{SHUNT}  shunt_{dev}^{s,t} $	+	→ Summe der Abweichungen der Kompensations – Stufenstellungen von mittleren Werten
$\omega_{shunt_{act}}$	$\times$	$\sum_{SHUNT}  shunt_{act}^{s,t} $	+	→ Summe der Abweichungen der Kompensations – Stufenstellungen von aktuellen Werten

# Übersicht

1. Hintergrund und Problemstellung
  1. Was ist ein Windparkcluster?
  2. Was kann ich damit machen?
2. Projektrahmen und Methodik
  1. Das BMWi-Projekt „IMOWEN“
  2. Das WCMS und das Optimierungstool GAMS-OPF
3. Simulationsergebnisse
  1. Modellierung des untersuchten Netzes
  2. Auswertung der Simulation
4. Ausblick

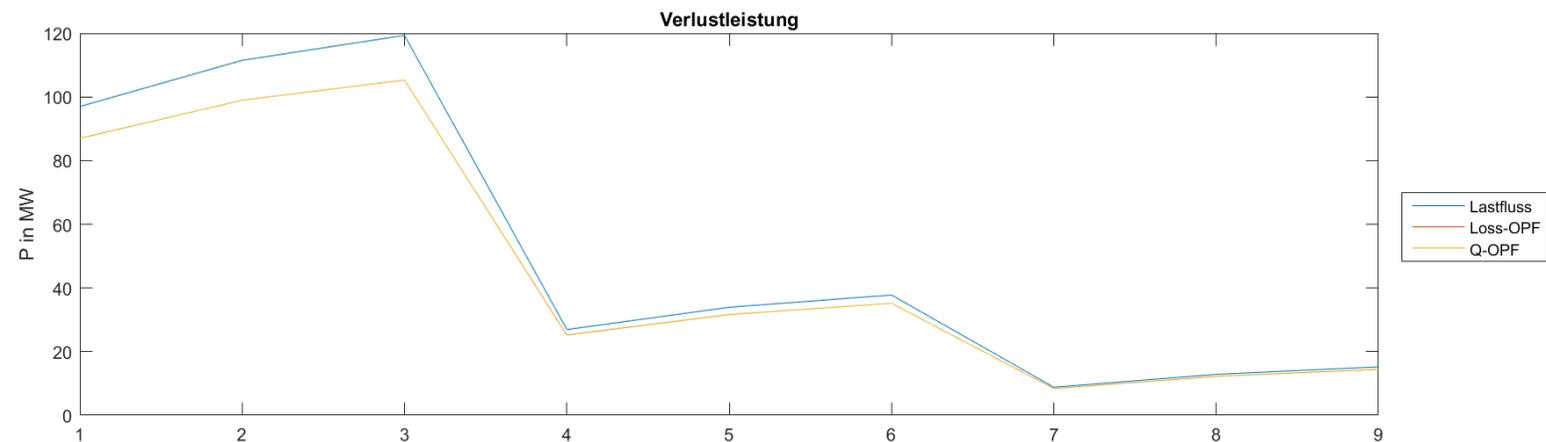
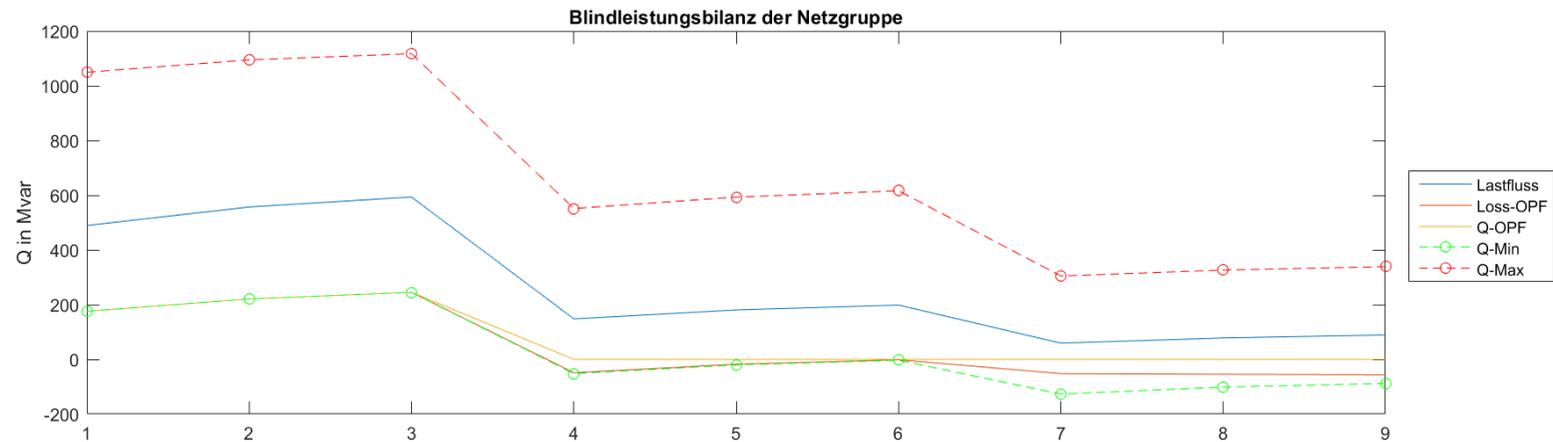
# 3.1 :: Modellierung des untersuchten Netzes



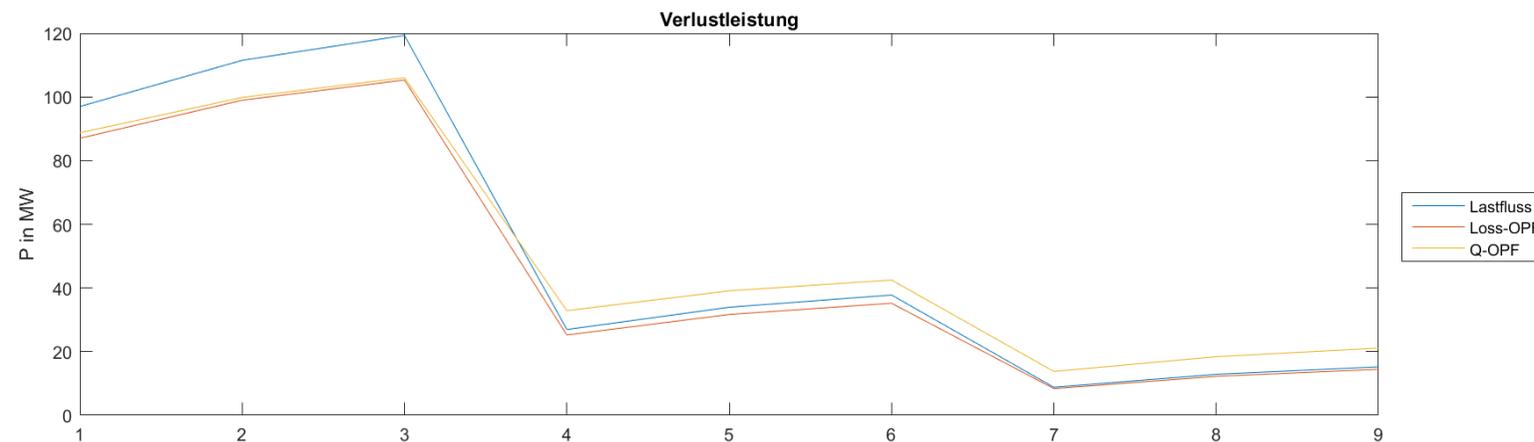
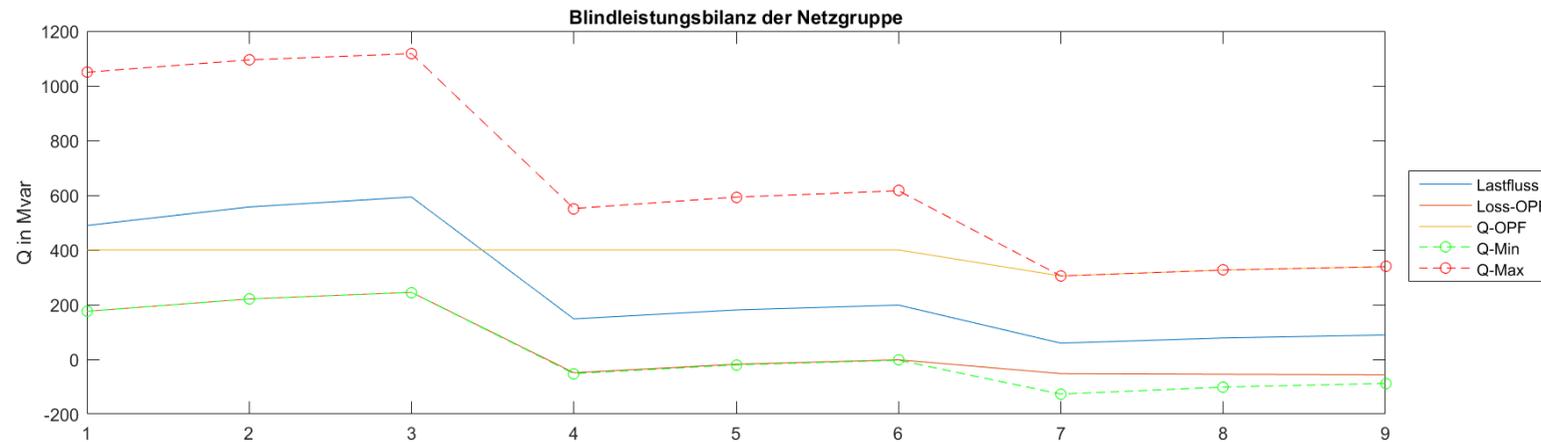
	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6	Fall 7	Fall 8	Fall 9
Wind	100	100	100	60	60	60	40	40	40
Last	100	60	40	100	60	40	100	60	40

**3 Übergaben zur 380 / 220 kV**

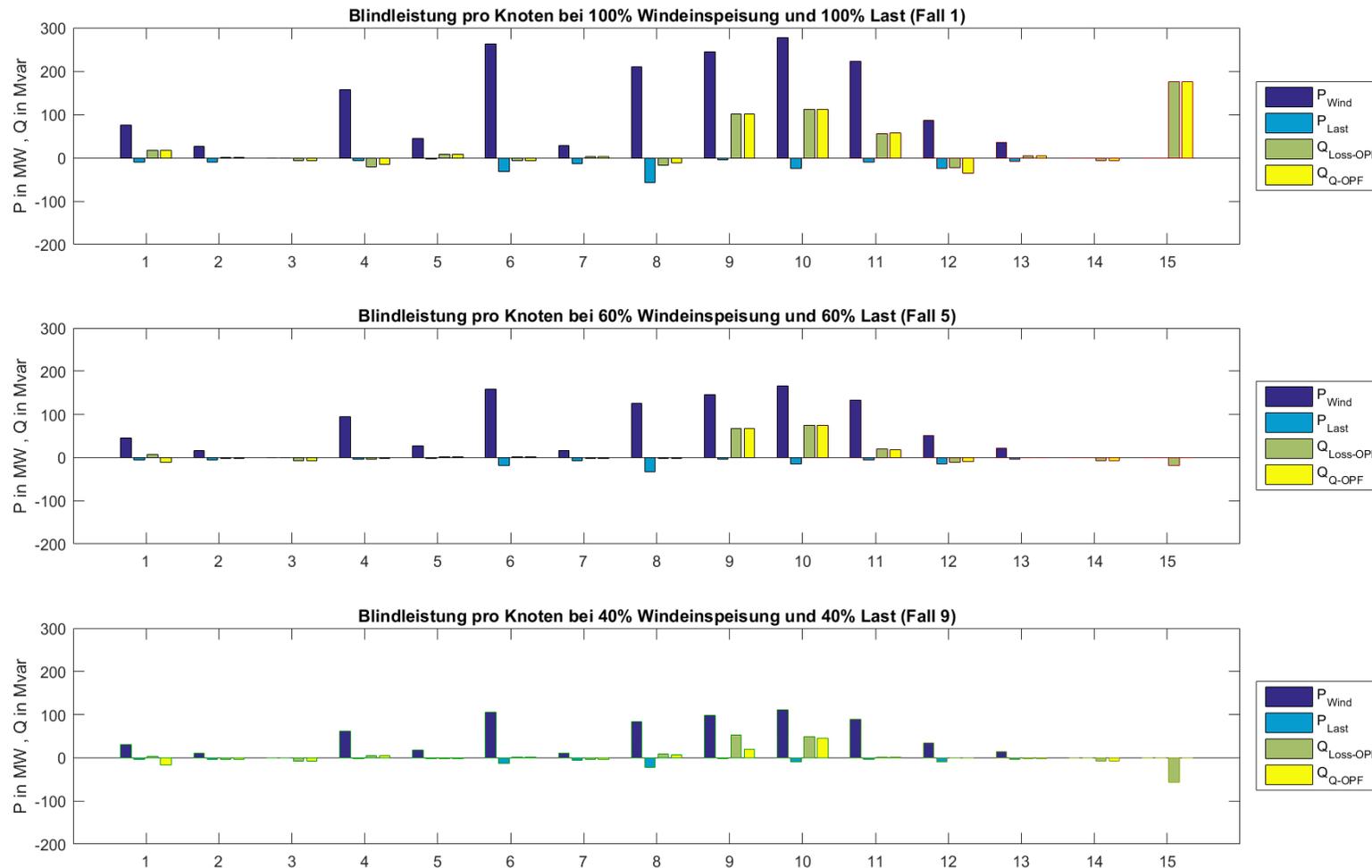
## 3.2 :: Auswertung der Simulation :: Blindleistungsbilanz (0 Mvar)



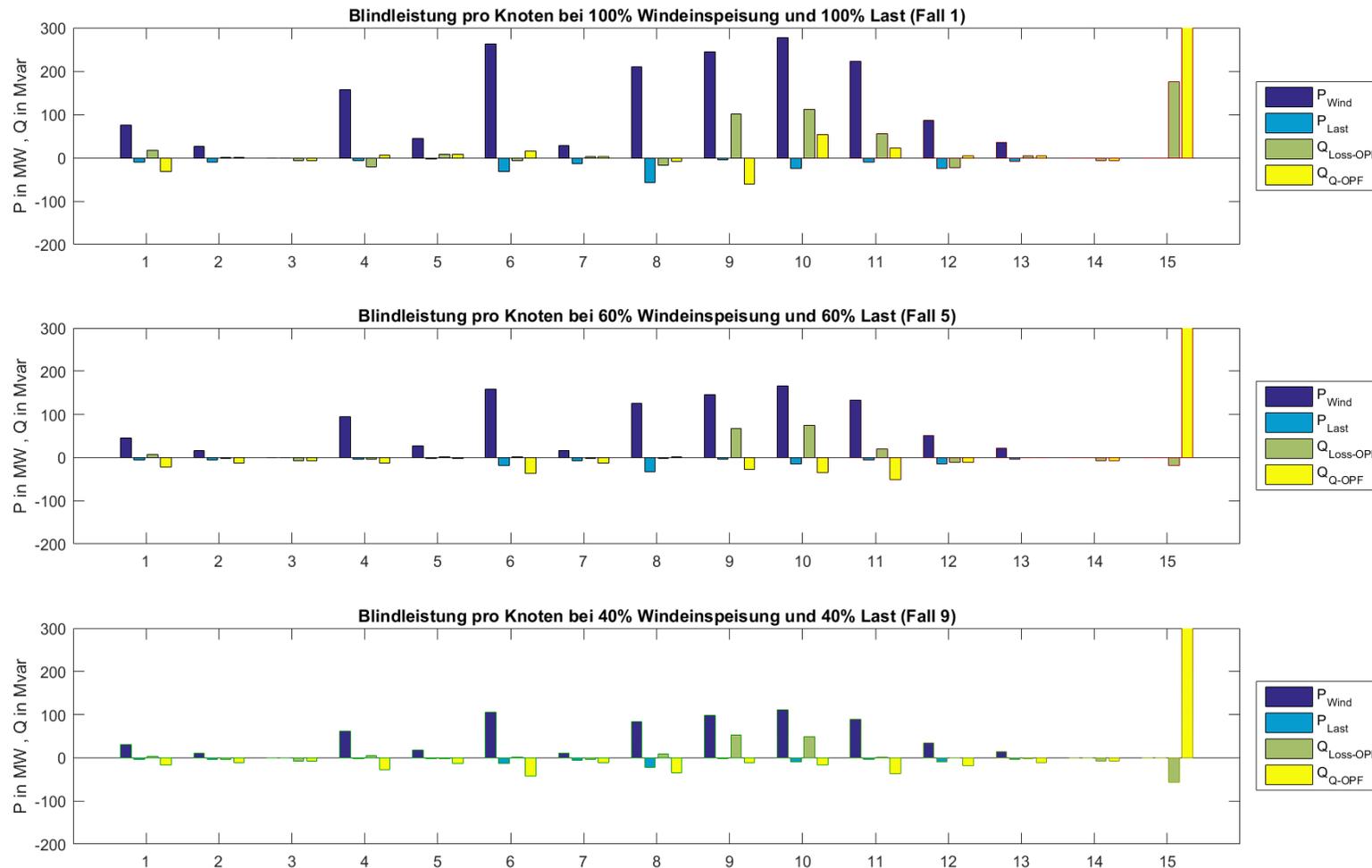
## 3.2 :: Auswertung der Simulation :: Blindleistungsbilanz (400 Mvar)



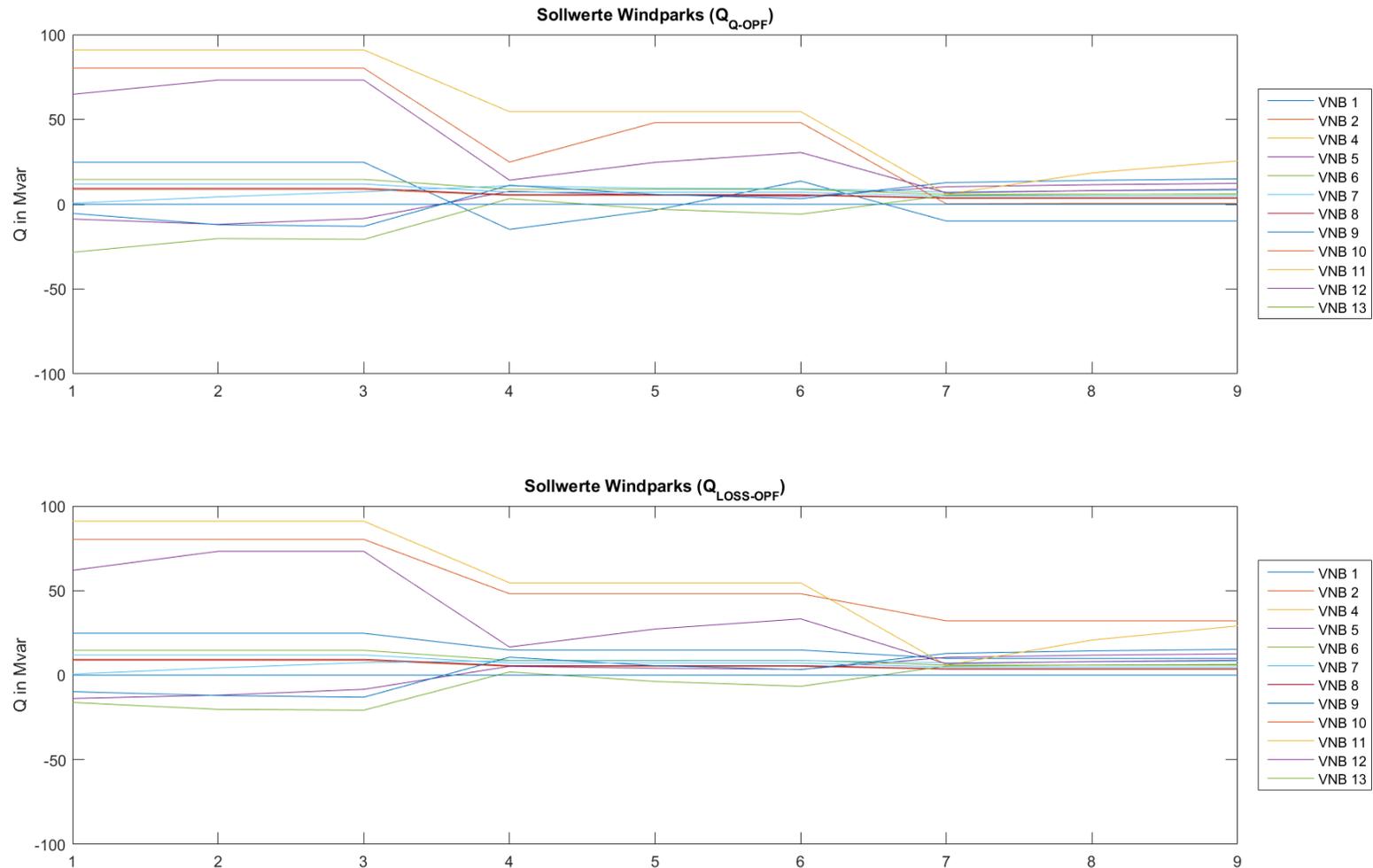
## 3.2 :: Auswertung der Simulation :: Knotensummen (0 Mvar)



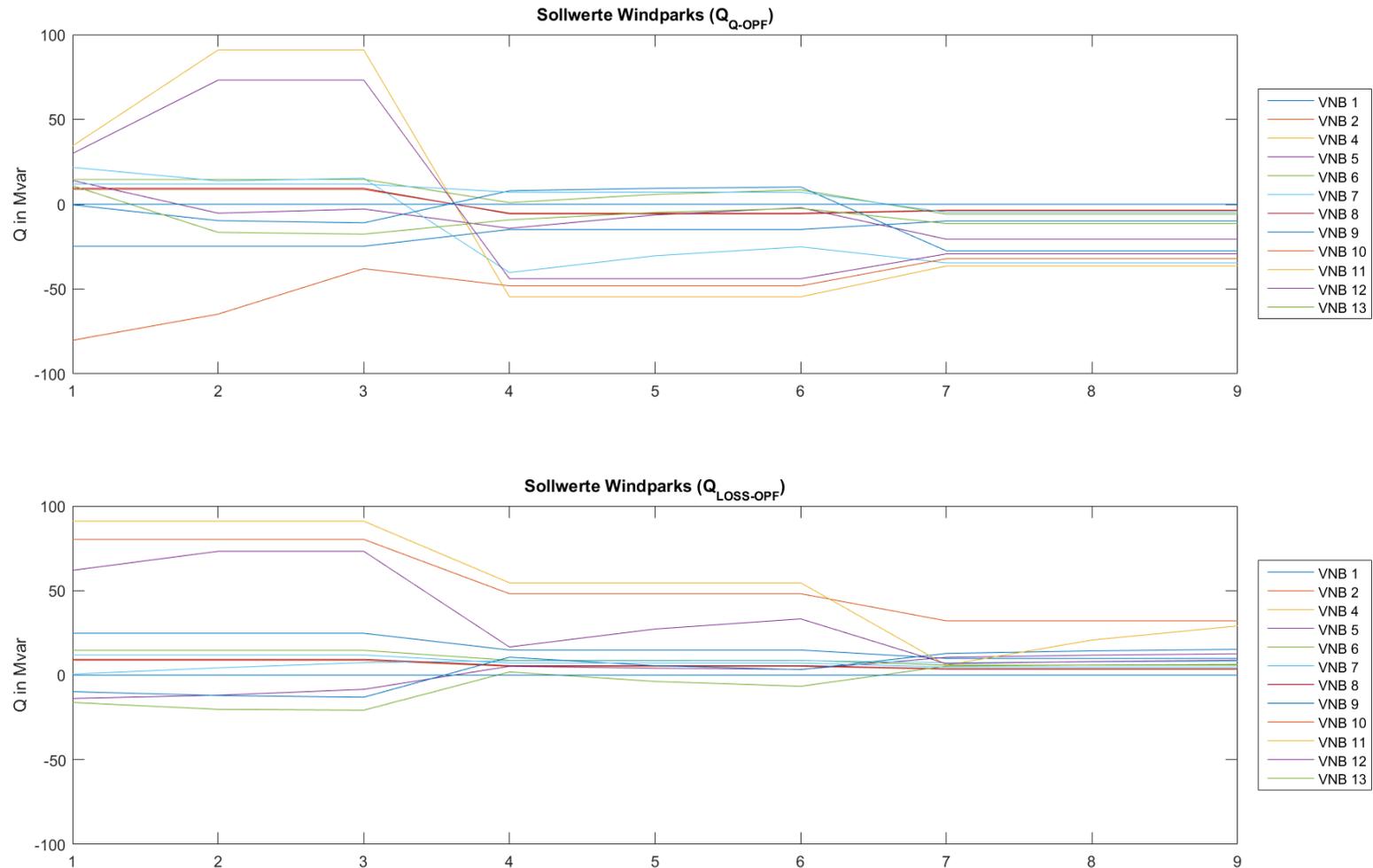
## 3.2 :: Auswertung der Simulation :: Knotensummen (400 Mvar)



## 3.2 :: Auswertung der Simulation :: Parksollwerte (0 Mvar)



## 3.2 :: Auswertung der Simulation :: Parksollwerte (400 Mvar)



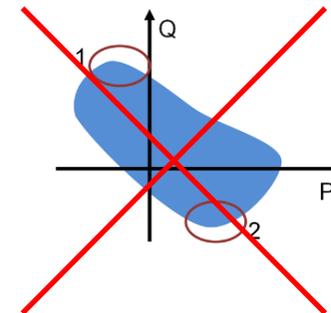
## 4. Ausblick

- Systemmodell wird weiter detailliert (Knoten & Anlagenanzahl)
- Extended Ward Randnetz inkl. szenarioabhängiger Parametrierung
- Diskrete Entscheidungsfindung durch den Optimierer (MINLP)
- Operatives Optimierungswerkzeug für Clusterbetrieb von WEA
- Demonstrator in der Leitwarte

# Forschung & Dienstleistungen des Fraunhofer IWES

## Übersicht zum Themenfeld ein aktives Blindleistungsmanagement

- Potentialstudien und Netzanalysen
- Optimierungsverfahren für den Netzbetrieb
- Echtzeit- und Jahressimulationen





## **David Sebastian Stock, M.Sc.**

Gruppenleiter Übertragungsnetze  
Bereich Energiewirtschaft und Netzbetrieb  
Fraunhofer-Institut für Windenergie und  
Energiesystemtechnik IWES

Königstor 59 | 34119 Kassel / Germany  
Phone +49 561 7294-458 | Fax +49 561 7294-260  
sebastian.stock@iwes.fraunhofer.de

# Vielen Dank! Fragen?