

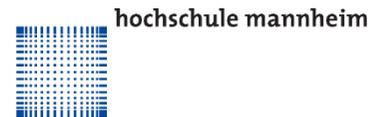
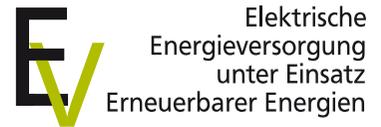
# Eignung und Auswirkung verschiedener Blindleistungsregelverfahren für Erzeugungsanlagen in generischen Mittelspannungsnetzen



Anna Pfendler, Christian Bott, Christian Lakenbrink, Thomas Hunger, Jutta Hanson

17. Symposium Energieinnovation (EnInnov) 2022  
(C) Zukunftsfähige Verteilnetze und Flexibilität

16. Februar 2022



- 1 Einleitung
- 2 Methodik
- 3 Generischer Strang
- 4 Generisches Netz
- 5 Fazit und Ausblick

---

## 1 Einleitung

---

2 Methodik

3 Generischer Strang

4 Generisches Netz

5 Fazit und Ausblick

### Technische Anschlussregeln Mittelspannung VDE-AR-N-4110

- Vorgabe für Netzplanung und Netzbetrieb:
  - 2-%-Spannungskriterium
  - Auslastung der Betriebsmittel
  - Verfahren zur Blindleistungsregelung



- Fokus auf statische Spannungshaltung im Netzparallelbetrieb
- Blindleistungshaushalt?
- Netzverluste?

- Stationäre Betrachtungen im Mittelspannungsnetz
- Vergleich der Blindleistungsregelverfahren im generischen Strang
- Auswertung der Q(U)-Regelung im generischen Netz
- Definition von Worst Cases und Best Cases

1 Einleitung

---

2 Methodik

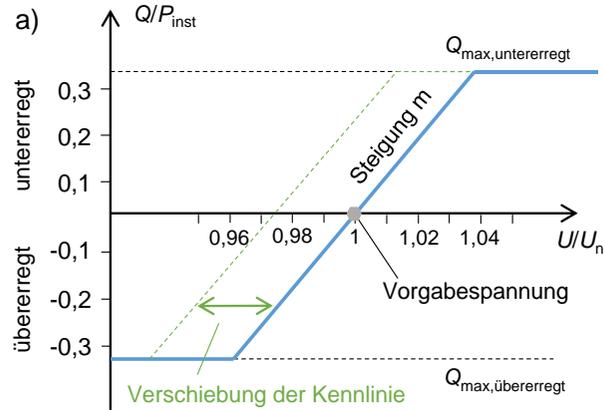
---

3 Generischer Strang

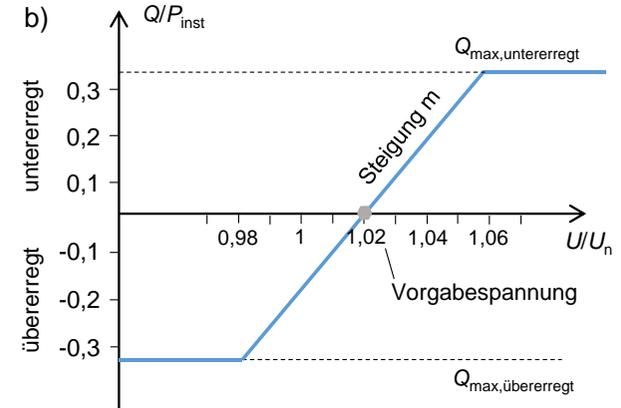
4 Generisches Netz

5 Fazit und Ausblick

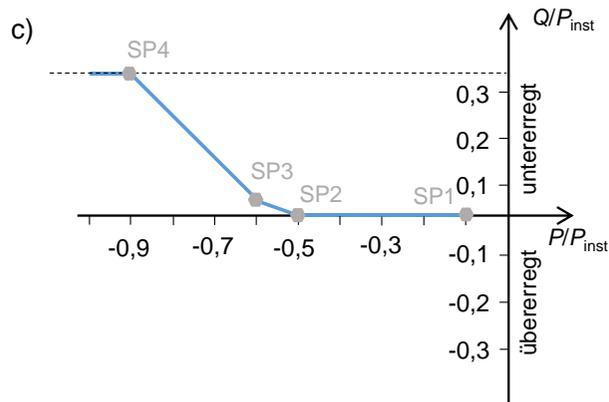
### Q(U)-Regelung VDE-AR-N-4110



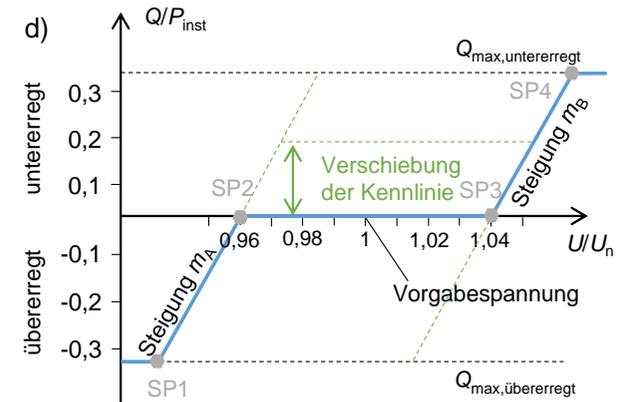
### Q(U)-Regelung TAB Netze BW



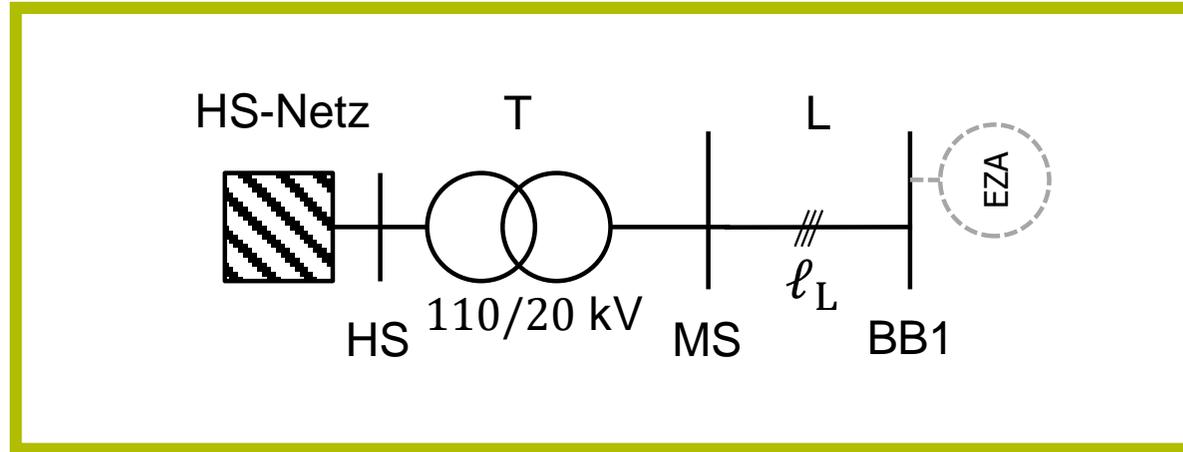
### Q(P)-Regelung VDE-AR-N-4110



### Spannungs- begrenzerfunktion



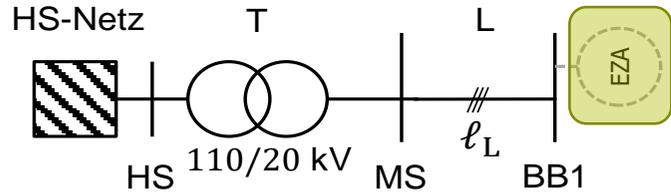
- 1 Einleitung
- 2 Methodik
- 3 Generischer Strang
- 4 Generisches Netz
- 5 Fazit und Ausblick



- Vergleich der Blindleistungsregelverfahren
- Vergleich verschiedener Leitungstypen
- Vergleich von konzentrierter und verteilter Erzeugung

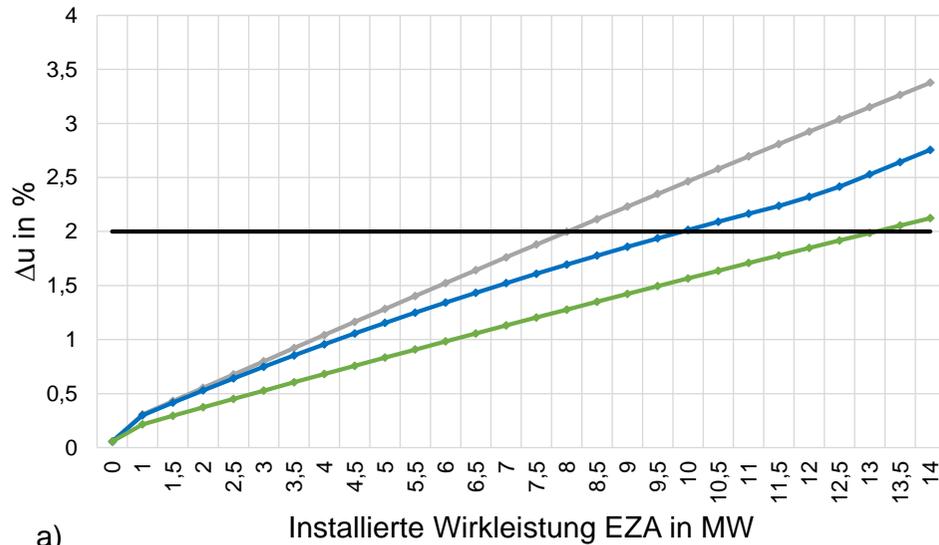
# Generischer Strang

## Vergleich der Blindleistungsregelverfahren



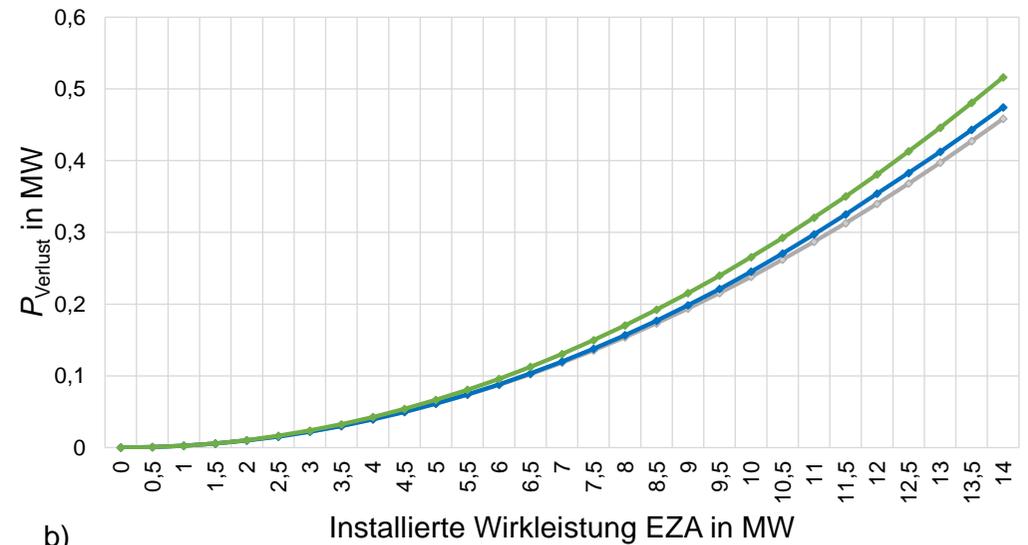
### Variation der Anlagengröße

- Maximal installierbare Leistung EZA
- Verluste  $P_{\text{Verlust}} = 3 \cdot R' \cdot \ell_L \cdot I^2$



a)

— cos(φ)=1 — Q(U)-Regelung — Q(P)-Regelung

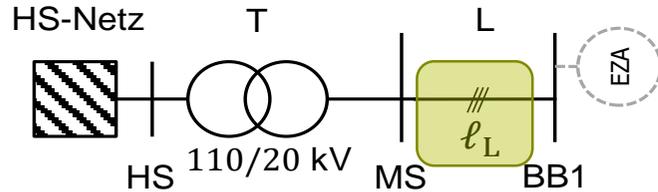


b)

— cos(φ)=1 — Q(U)-Regelung — Q(P)-Regelung

# Generischer Strang

## Vergleich der Leitungstypen



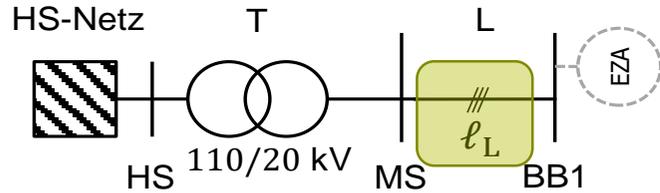
### Variation des Leitungstyps

- Maximal installierbare Leistung EZA  $S_{EZA} = P_{EZA} + jQ_{EZA}$
- $\cos(\varphi)$  und Leitungslänge  $l_L$  variabel

$l_L$	Kabel 1x185 mm <sup>2</sup>			Kabel 1x300 mm <sup>2</sup>			Freileitung 122-AL1/20-ST1A		
	5 km	10 km	12 km	5 km	10 km	12 km	5 km	10 km	12 km
$S_{EZA}$ in MVA	10,6	9,6	7,5	13,9	13,9	13,9	14,2	14,2	14,2
$P_{EZA}$ in MW	10,59	9,1	7,1	13,9	13,7	13,5	14	13,6	13,5
$Q_{EZA}$ in Mvar	0,5	3	2,3	0	2,4	3,1	2,5	4	4,3
$\cos(\varphi)$	0,999	0,950	0,950	1	0,985	0,975	0,984	0,959	0,953
$\Delta u_1$ in %	2 %	2 %	2 %	1,7 %	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %

# Generischer Strang

## Vergleich der Leitungstypen



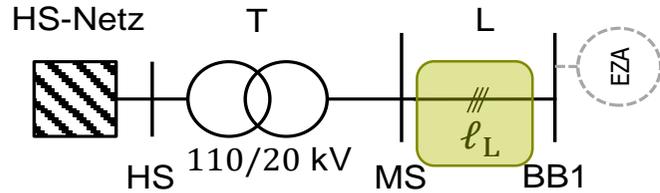
### Variation des Leitungstyps

- Maximal installierbare Leistung EZA  $S_{EZA} = P_{EZA} + jQ_{EZA}$
- $\cos(\varphi)$  und Leitungslänge  $l_L$  variabel

$l_L$	Kabel 1x185 mm <sup>2</sup>			Kabel 1x300 mm <sup>2</sup>			Freileitung 122-AL1/20-ST1A		
	5 km	10 km	12 km	5 km	10 km	12 km	5 km	10 km	12 km
$S_{EZA}$ in MVA	10,6	9,6	7,5	13,9	13,9	13,9	14,2	14,2	14,2
$P_{EZA}$ in MW	10,59	9,1	7,1	13,9	13,7	13,5	14	13,6	13,5
$Q_{EZA}$ in Mvar	0,5	3	2,3	0	2,4	3,1	2,5	4	4,3
$\cos(\varphi)$	0,999	0,950	0,950	1	0,985	0,975	0,984	0,959	0,953
$\Delta u_1$ in %	2 %	2 %	2 %	1,7 %	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %

# Generischer Strang

## Vergleich der Leitungstypen



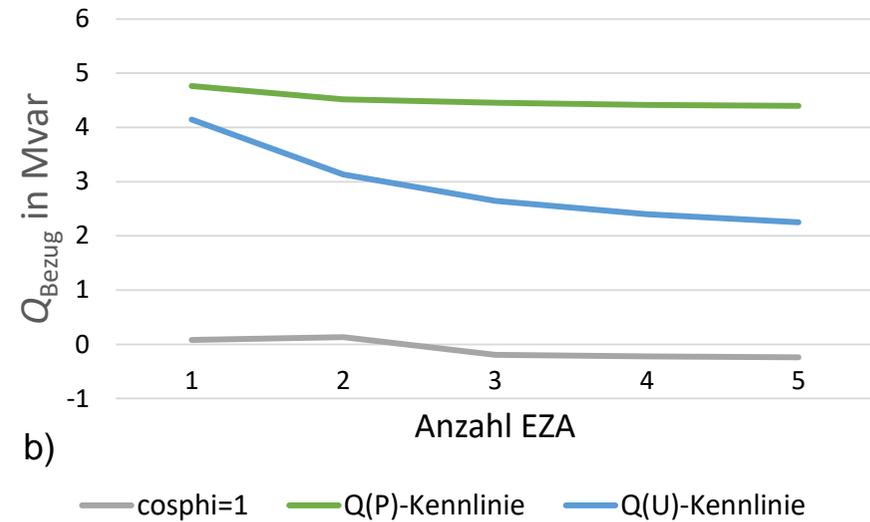
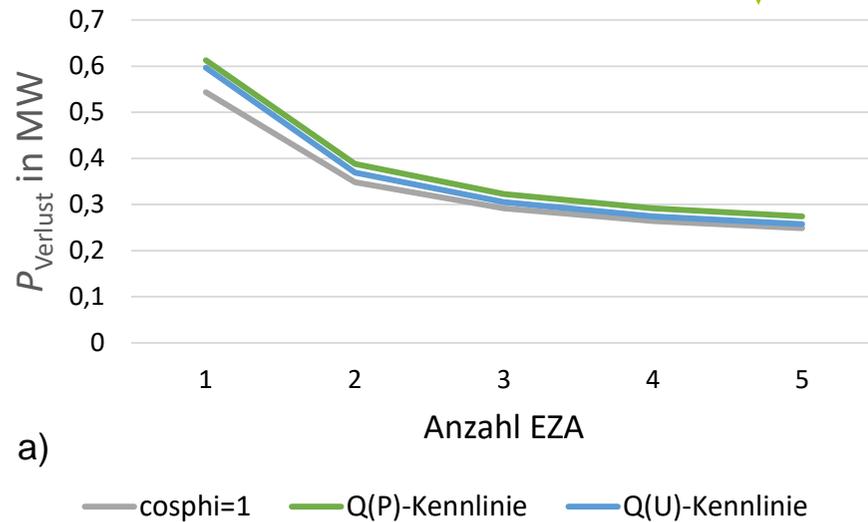
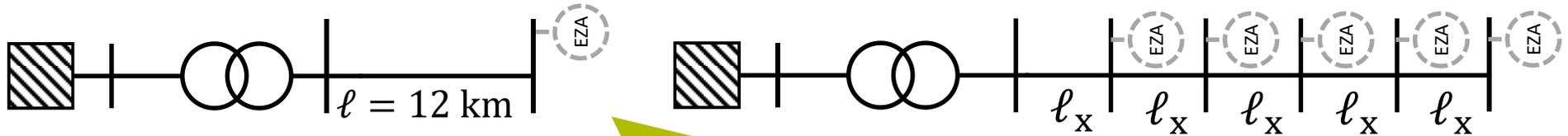
### Variation des Leitungstyps

- Maximal installierbare Leistung EZA  $S_{EZA} = P_{EZA} + jQ_{EZA}$
- $\cos(\varphi)$  und Leitungslänge  $l_L$  variabel

$l_L$	Kabel 1x185 mm <sup>2</sup>			Kabel 1x300 mm <sup>2</sup>			Freileitung 122-AL1/20-ST1A		
	5 km	10 km	12 km	5 km	10 km	12 km	5 km	10 km	12 km
$S_{EZA}$ in MVA	10,6	9,6	7,5	13,9	13,9	13,9	14,2	14,2	14,2
$P_{EZA}$ in MW	10,59	9,1	7,1	13,9	13,7	13,5	14	13,6	13,5
$Q_{EZA}$ in Mvar	0,5	3	2,3	0	2,4	3,1	2,5	4	4,3
$\cos(\varphi)$	0,999	0,950	0,950	1	0,985	0,975	0,984	0,959	0,953
$\Delta u_1$ in %	2 %	2 %	2 %	1,7 %	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %

# Generischer Strang

## Vergleich von konzentrierter und verteilter EZA



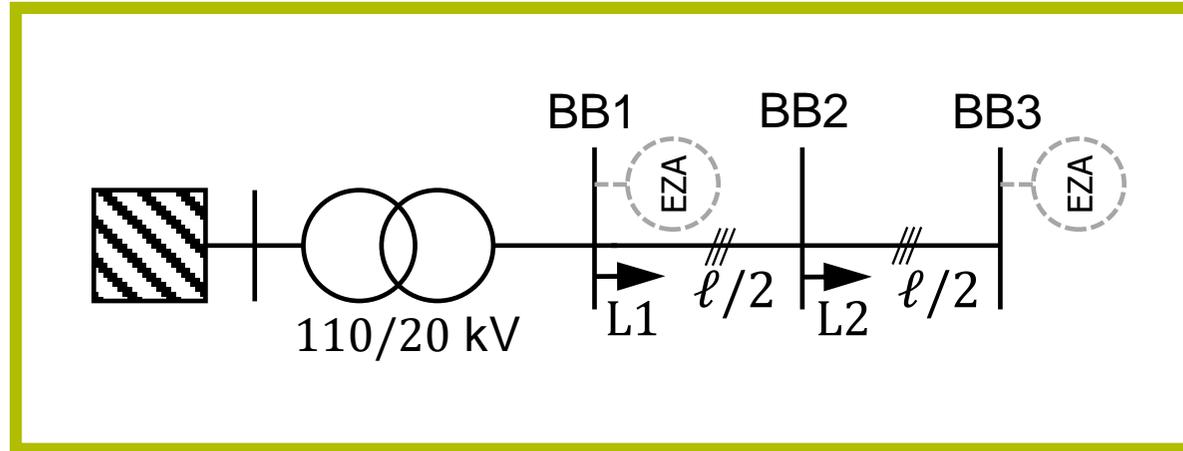
### **Zwischenfazit**

- Worst-Case-Szenario: Konzentrierte EZA am Ende des Stranges und lange Leitungslängen
- Regelverfahren: Q(U)-Regelung ermöglicht guten Kompromiss aus Spannungshaltung und Netzverlusten
- Leitungstyp: Zukünftiges Kabel mit  $1 \times 300 \text{ mm}^2$  liefert die beste Möglichkeit dezentrale EZA zu integrieren

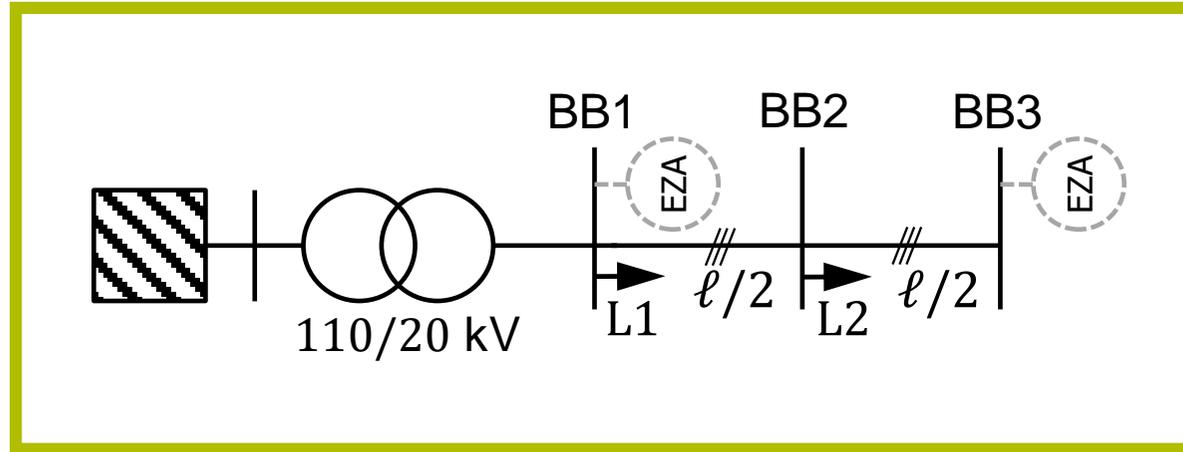
### **Untersuchungen im generischen Netz**

- Zusammenspiel aus EZA und Lasten?
- Zusammenspiel mehrerer Stränge?

- 1 Einleitung
- 2 Methodik
- 3 Generischer Strang
- 4 **Generisches Netz**
- 5 Fazit und Ausblick



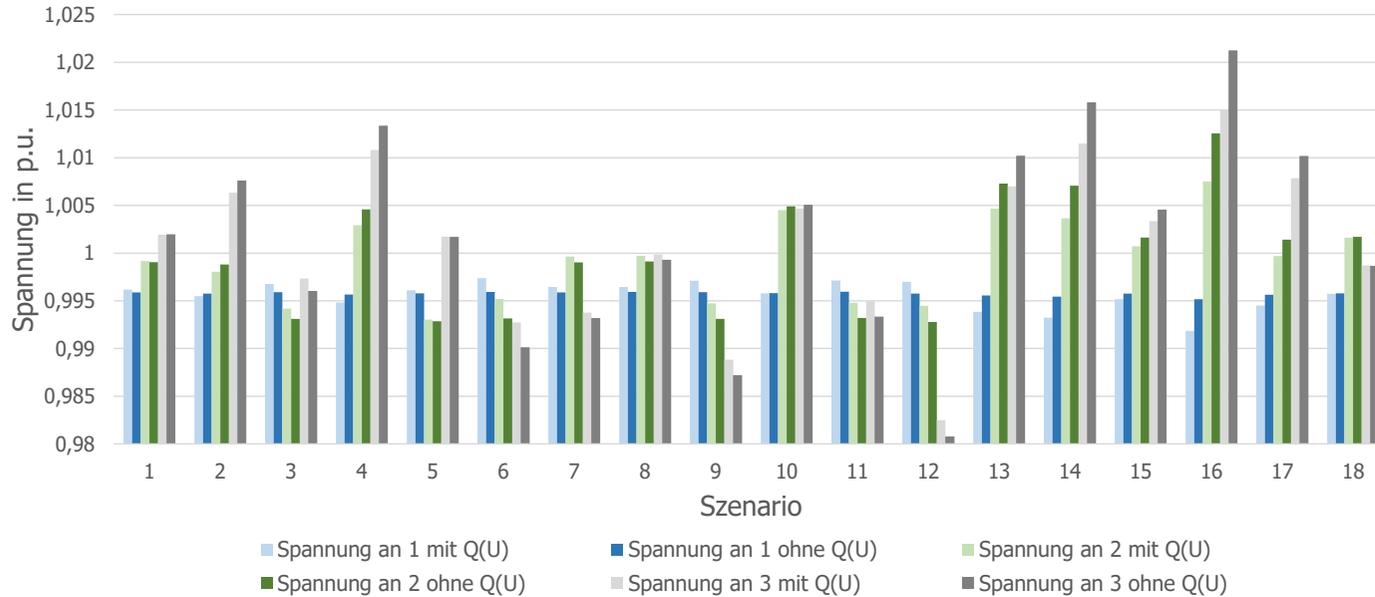
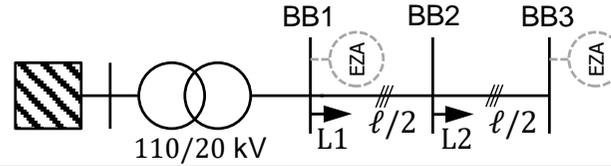
- Untersuchung des Zukunftsszenarios (Kabel 1x300 mm<sup>2</sup>)
- Untersuchung der Q(U)-Regelung
- Untersuchung des Zusammenspiels aus EZA und Last
- Untersuchung homogener und inhomogener generischer Netze



Szenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
EZA 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
EZA 2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
L1	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3
L2	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3

# Generisches Netz

## Zusammenspiel EZA und Last



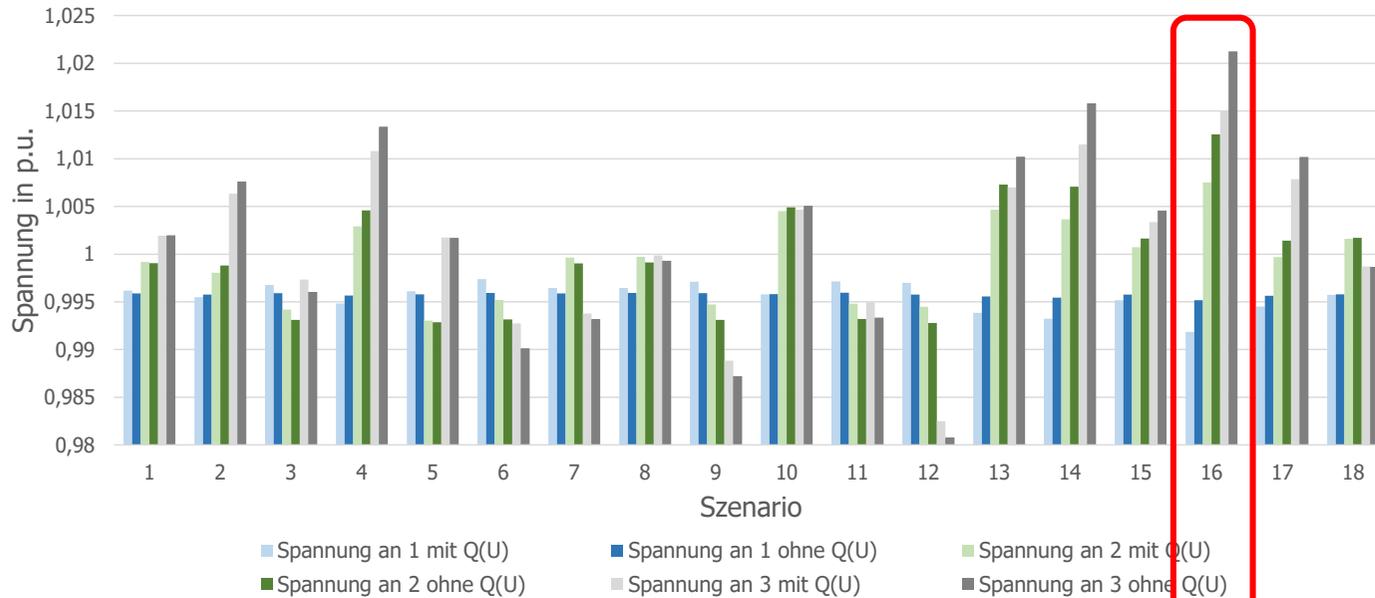
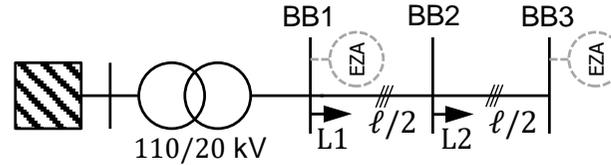
Szenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
EZA 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
EZA 2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
L1	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3
L2	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3

### Ergebnisse Spannungshaltung:

- Für alle Szenarien gilt  $0,98 \text{ p.u.} < u < 1,025 \text{ p.u.}$

# Generisches Netz

## Zusammenspiel EZA und Last



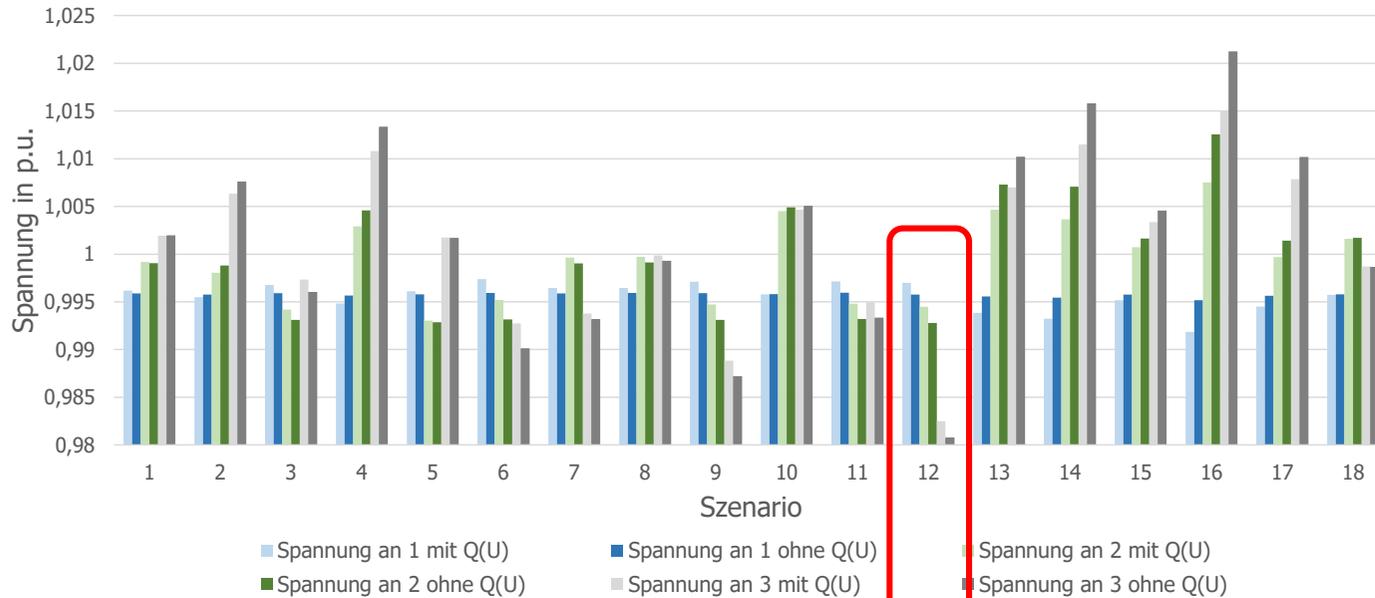
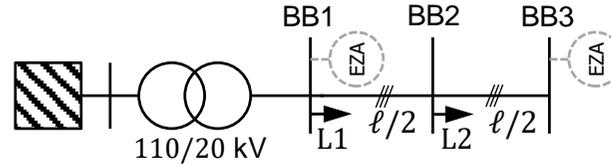
Szenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
EZA 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
EZA 2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
L1	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3
L2	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3

### Ergebnisse Spannungshaltung:

- Für alle Szenarien gilt  $0,98 \text{ p.u.} < u < 1,025 \text{ p.u.}$
- Stärkster Einfluss der Q(U)-Regelung, wenn Lasten an BB1 angeschlossen sind und EZA weiter entfernt

# Generisches Netz

## Zusammenspiel EZA und Last



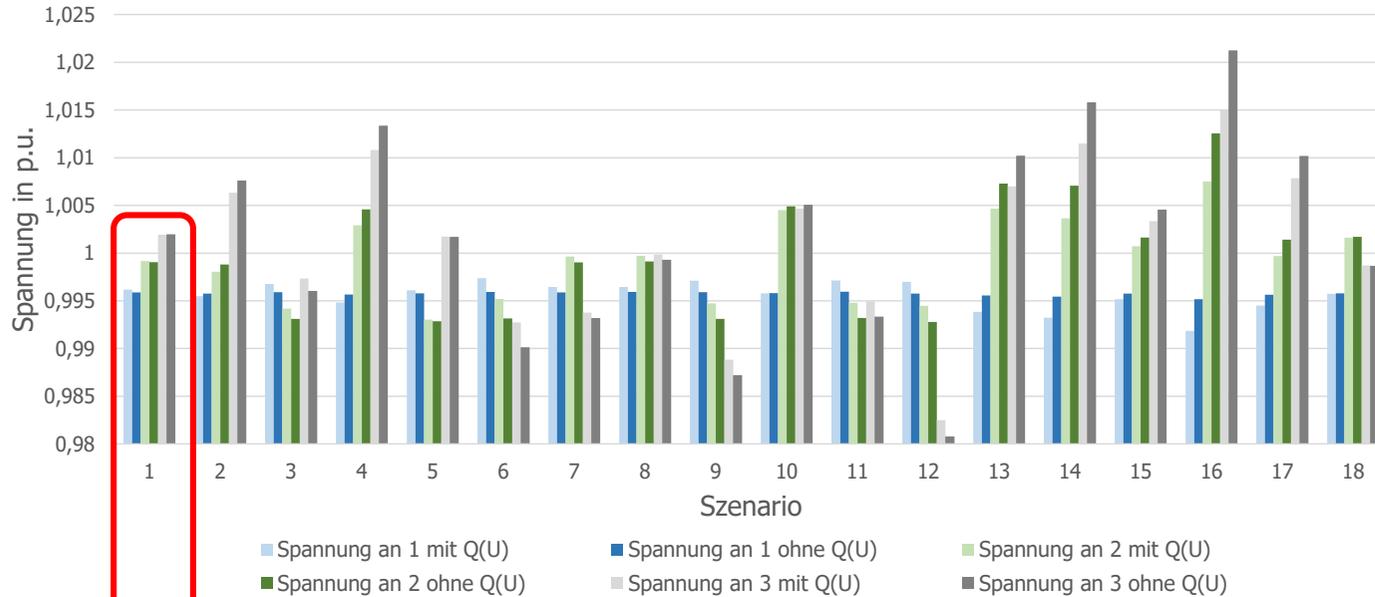
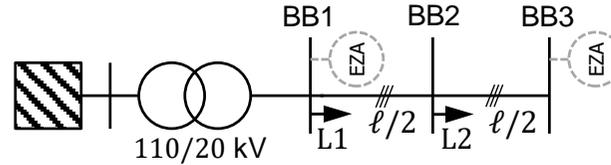
Szenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
EZA 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
EZA 2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
L1	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3
L2	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3

### Ergebnisse Spannungshaltung:

- Für alle Szenarien gilt  $0,98 \text{ p.u.} < u < 1,025 \text{ p.u.}$
- Stärkster Einfluss der Q(U)-Regelung, wenn Lasten an BB1 angeschlossen sind und EZA weiter entfernt
- Geringerer Einfluss der Q(U)-Regelung im umgekehrten Fall

# Generisches Netz

## Zusammenspiel EZA und Last



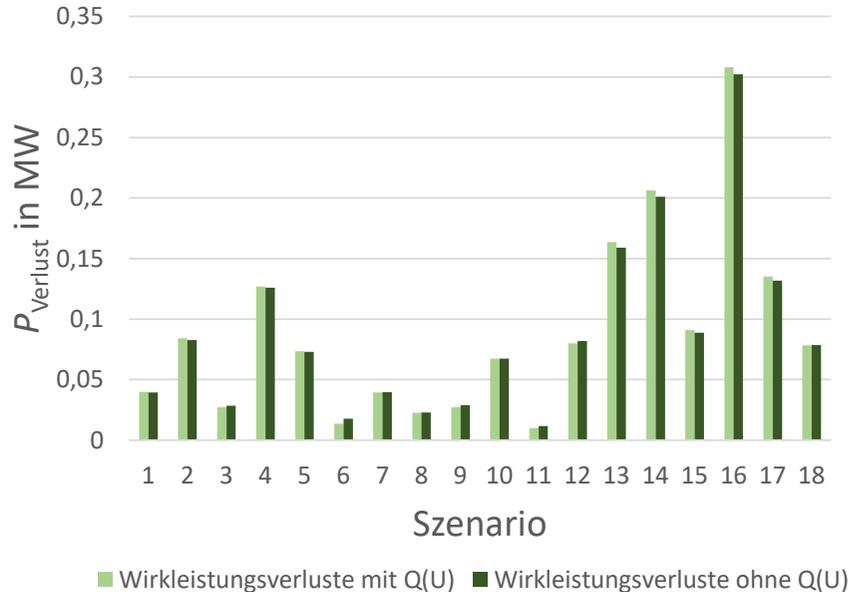
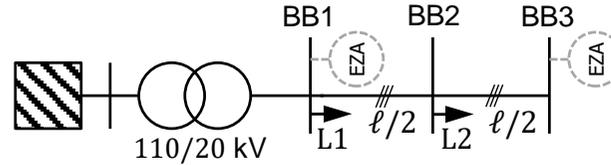
Szenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
EZA 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
EZA 2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
L1	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3
L2	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3

### Ergebnisse Spannungshaltung:

- Für alle Szenarien gilt  $0,98 \text{ p.u.} < u < 1,025 \text{ p.u.}$
- Stärkster Einfluss der Q(U)-Regelung, wenn Lasten an BB1 angeschlossen sind und EZA weiter entfernt
- Geringerer Einfluss der Q(U)-Regelung im umgekehrten Fall
- Geringster Einfluss der Q(U)-Regelung, bei lokalem Ausgleich aus EZA und Last

# Generisches Netz

## Zusammenspiel EZA und Last



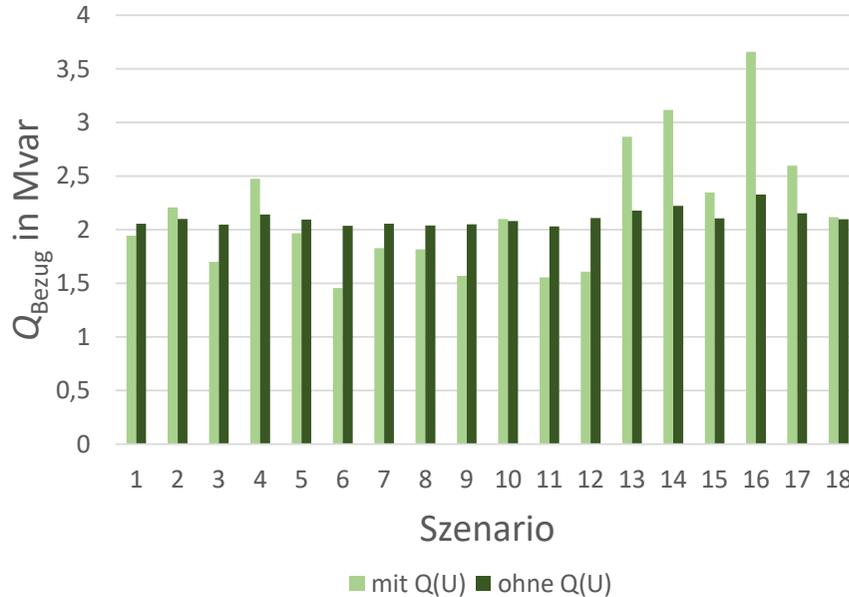
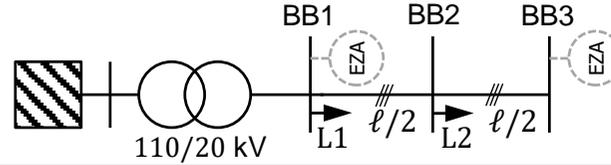
### Ergebnisse Netzverluste:

- Unterschied aufgrund der Blindleistungsregelung ist relativ klein
- Am Anfang des Strangs kann die Q(U)-Regelung die Verluste leicht reduzieren (Szenarien 7-12)
- Am Ende des Strangs sorgt die Q(U)-Regelung für zusätzliche Verluste (z.B. Szenario 16)

Szenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
EZA 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
EZA 2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
L1	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3
L2	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3

# Generisches Netz

## Zusammenspiel EZA und Last



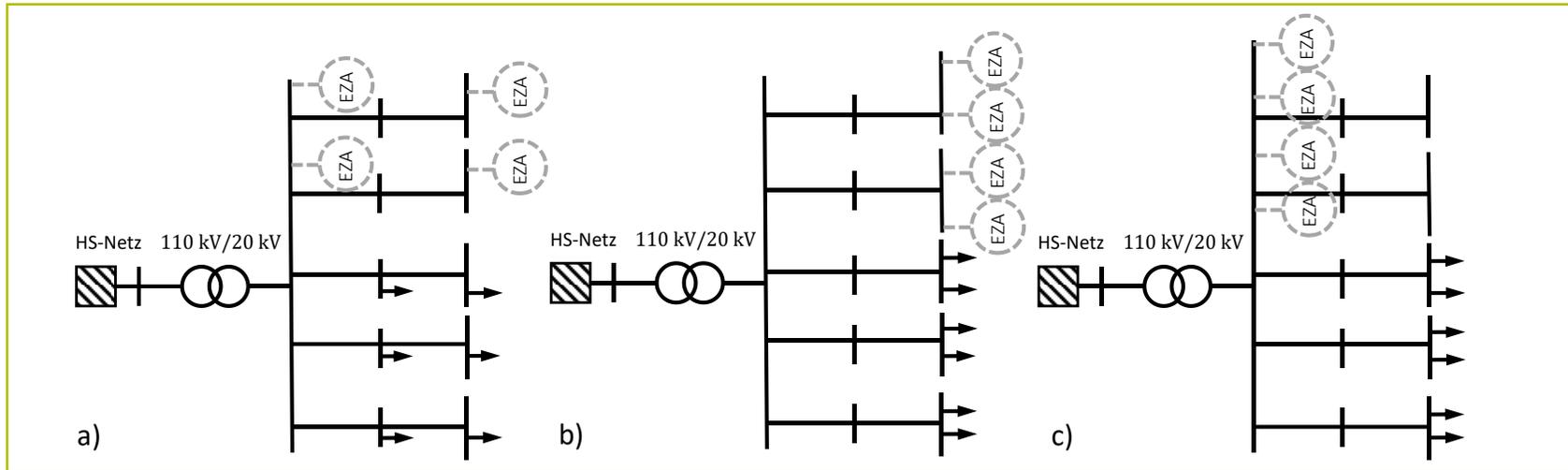
Szenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
EZA 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
EZA 2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
L1	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3
L2	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3

### Ergebnisse Blindleistungsbezug:

- Bei lokalem Ausgleich der Blindleistung kann der Blindleistungsbedarf aus dem überlagerten Netz reduziert werden
- Worst Case: Szenario 16

# Generisches Netz

## Inhomogene Netze



	Fall a		Fall b		Fall c	
	Mit Q(U)	Ohne Q(U)	Mit Q(U)	Ohne Q(U)	Mit Q(U)	Ohne Q(U)
<b><math>P_{\text{Verlust}}</math> in MW</b>	0,510	0,506	1,41	1,36	0,431	0,433
<b><math>Q_{\text{Bezug}}</math> in Mvar</b>	6,31	5,58	11,30	6,53	5,08	5,52
<b><math>U_{\text{max}}</math> in p.u.</b>	1,011	1,015	1,020	1,028	0,998	0,997
<b><math>U_{\text{min}}</math> in p.u.</b>	0,977	0,979	0,968	0,970	0,974	0,973

- 1 Einleitung
- 2 Methodik
- 3 Generischer Strang
- 4 Generisches Netz
- 5 **Fazit und Ausblick**

- Q(U)-Regelung in der Nähe des Umspannwerkes reduziert Blindleistungsbedarf aus überlagertem Hochspannungsnetz
- In keinem der generischen Szenarien ist eine Blindleistungsregelung zur statischen Spannungshaltung notwendig
- Worst-Case-Szenario: Inhomogenes Netz

### Zukünftige Untersuchungen im realen Netz

- Interaktion mit Stufensteller
- Unterschiedliche Leitungstypen
- Teilweise Ringstrukturen

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

**Für Fragen stehe ich gerne zur Verfügung.**



**Anna Pfendler, M.Sc.**  
Wissenschaftliche Mitarbeiterin

**Technische Universität Darmstadt**  
Institut Elektrische Energiesystem  
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung unter  
Einsatz Erneuerbarer Energien (E5)

[anna.pfendler@e5.tu-darmstadt.de](mailto:anna.pfendler@e5.tu-darmstadt.de)  
Internet: [www.e5.tu-darmstadt.de](http://www.e5.tu-darmstadt.de)

