



**POWERFACTORY**

# Einfluss der Blockierung von Stufenstellern im Rahmen der automatischen Letztmaßnahmen

**Graz, 12.02.2026**

Sebastian Palm – DIgSILENT GmbH

Steve Mielert – Hamburger Energienetze GmbH

Mathias Dumke, Ronald Halbauer – Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH

Uwe Zickler, Robert Knoll – Thüringer Energienetze GmbH

Nayeemuddin Ahmed – WEMAG Netz GmbH

**POWER SYSTEM SOLUTIONS**

MADE IN GERMANY

- 1. Motivation**
- 2. Lastmodellmessungen**
- 3. Simulationen im MS-Netz**
- 4. Zusammenfassung**

# 1. Motivation

- In VDE-AR-N 4142<sup>1</sup> ist eine Maßnahme bei einem drohenden Spannungskollaps das automatische Blockieren der Regler von HS/MS-Transformatoren und deren unterlagerter Transformatoren ► **Annahme bisher:** Spannungsabsenkung führt zu geringerem induktiven Verhalten der Lasten
- **Untersuchung der Wirksamkeit der Blockade HS/MS-Traforegler** unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren:
  - Zusammensetzung und Verhalten der Verbrauchsanlagen (IST und zukünftig)
  - Erwarteter Zubau und Verhalten dezentraler Erzeugungsanlagen
  - Ausbau der Verteilnetze mit einem zunehmenden Verkabelungsgrad
  - Einsatz spannungsregelnder Komponenten wie rONT
- **Untersuchungsfokus:** (Blind-)Leistungsaustausch mit dem vorgelagerten Netz

<sup>1</sup> VDE, "Automatische Letztmaßnahmen," VDE-AR-N 4142, 1. April, 2020.

## 2. Lastmodellmessungen

## Exponentialmodell

- Geht von einem exponentiellen Zusammenhang bei Wirk- und Blindleistung aus:
  - $k_{pu} = 0$ : konstante Leistung
  - $k_{pu} = 2$ : konstante Impedanz

$$P_{\text{EXP}}(U, f) = P_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right)^{k_{pu}} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{k_{pf}}$$

$$Q_{\text{EXP}}(U, f) = Q_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right)^{k_{qu}} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{k_{qf}}$$

## Polynomialmodell (ZIP-Modell)

- Trennt die Last in
  - Z, proportional zu  $U^2$ : konstante Impedanz
  - I, proportional zu  $U$ : konstanter Strom
  - P, unabhängig von  $U$ : konstante Leistungsaufnahme

$$P_{\text{ZIP}}(U, f) = P_0 \cdot \left( a_p \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 + b_p \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right) + c_p \right) \cdot (1 + d_p \cdot \Delta f)$$

$$Q_{\text{ZIP}}(U, f) = Q_0 \cdot \left( a_q \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 + b_q \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right) + c_q \right) \cdot (1 + d_q \cdot \Delta f)$$

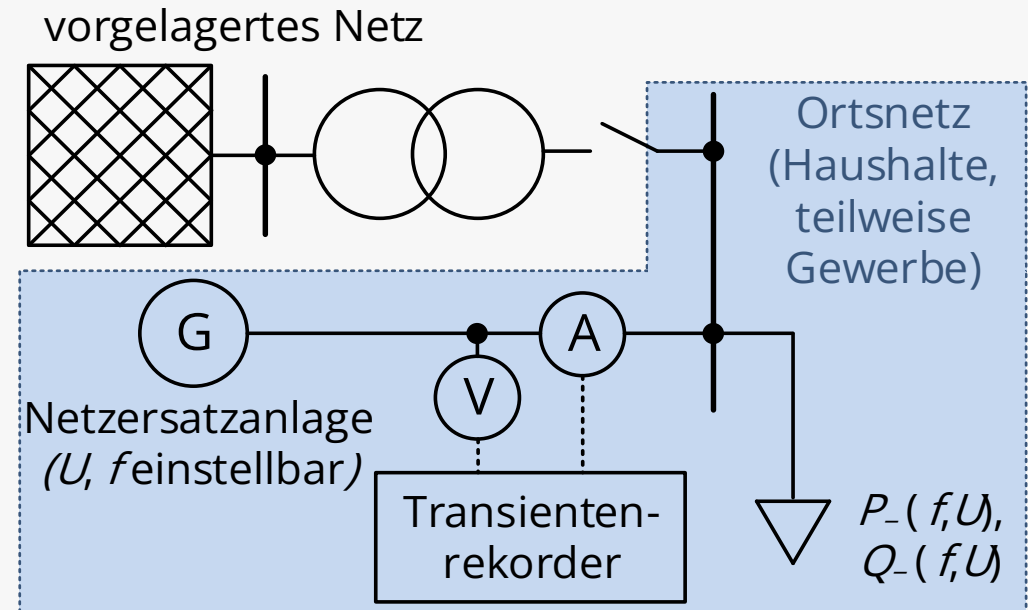
**Problem:** Funktionieren nicht für  $Q_0$  nahe Null oder zwischen negativ und positiv schwankend

$$a + b + c = 1$$

- Palm 2017: Messungen in realen Ortsnetzen während geplanter Wartungsarbeiten mit Netztrennung
- Versorgung über Netzersatzanlage mit einstellbaren  $U$ - und  $f$ -Sollwerten (insgesamt je ca. 320 Sprünge)
- Kompensationseffekte und  $Q_{LM}$  nahe Null müssen abgebildet werden können
- Entwicklung eines neuen Lastmodells:

$$P_{LM}(U, f) = P_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right)^{k_{pu}} \cdot \left(1 + k_{pf} \cdot \left(\frac{f - f_0}{f_0}\right)\right)$$

$$Q_{LM}(U, f) = Q_0 + \underbrace{P_0 \cdot \left(k_{qu} \cdot \left(\frac{U - U_0}{U_0}\right) + k_{qf} \cdot \left(\frac{f - f_0}{f_0}\right)\right)}_{\Delta Q(U, f)}$$

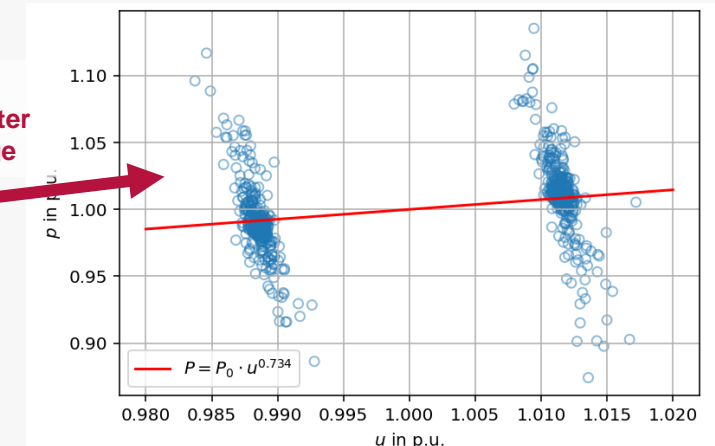
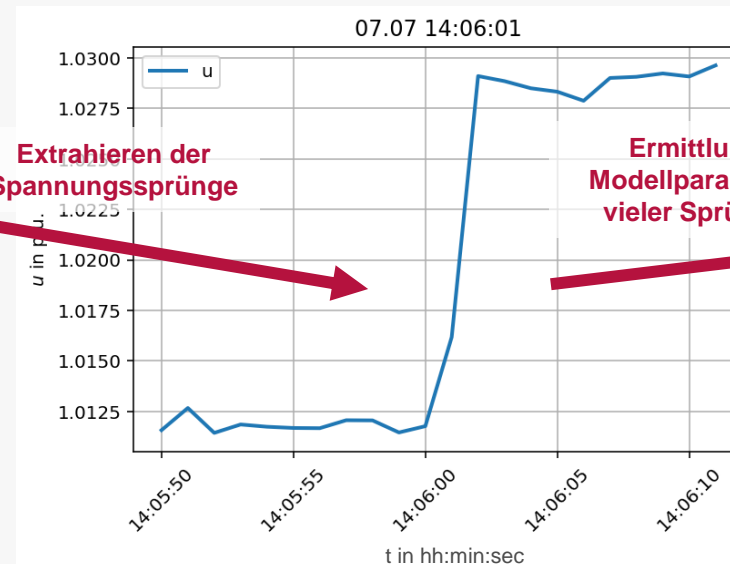
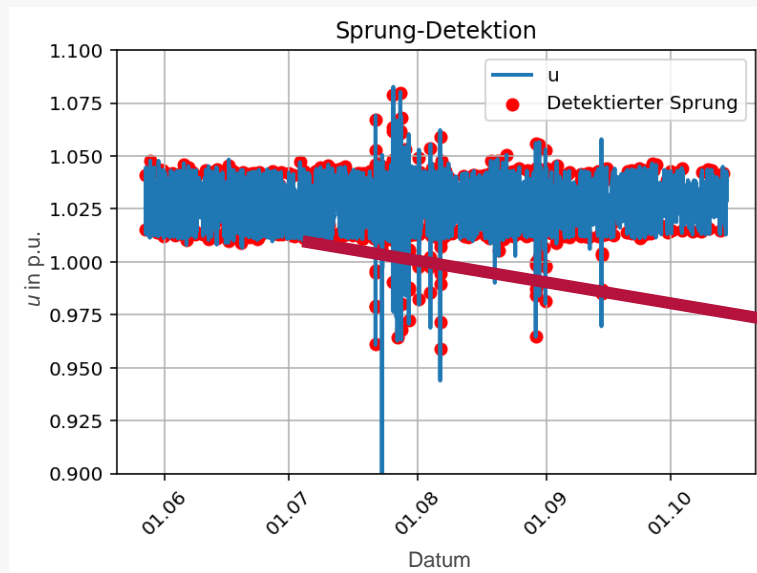


Palm 2017: S. Palm, P. Schegner und T. Schnelle, " Measurement and modeling of voltage and frequency dependences of low-voltage loads," 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting , Chicago, IL, USA, 2017, doi: 10.1109/PESGM.2017.8273781.

Netz	Messorte	Messdaten	Anzahl <i>U</i> -Sprünge	Netzstruktur
Netz A	<ul style="list-style-type: none"><li>1 HS/MS-Transformator</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Messung über 4 Monate</li></ul>	687 manuell	Städtisch
Netz B	<ul style="list-style-type: none"><li>1 Abgang inklusive mehrerer Messungen innerhalb des Abgangs (Herausrechnen Einspeisung)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Messung über 6 Monate</li></ul>	509 geregelt 129 manuell	Ländlich
Netz C	<ul style="list-style-type: none"><li>2 HS/MS-Transformatoren</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Messung über 2 Wochen</li></ul>	292 manuell	Ländlich

# Vorbereitung der Messkampagnen

- Durchführung von Messungen bei mehreren Verteilnetzbetreibern am HS/MS-Transformator
- Gezielte und wiederholte Stufung der Transformator-Stufensteller
- Teilweise Erfassung zusätzlicher “natürlicher” Stufungen bzw. Spannungssprünge bei kontinuierlicher Messung
- Skriptgestützte Auswertung der Messdaten:



- Vergleich Parameter des Lastmodells:

$$P_{LM}(U) = P_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0}\right)^{k_{pu}}$$

$$Q_{LM}(U) = Q_0 + P_0 \cdot k_{qu} \cdot \left(\frac{U - U_0}{U_0}\right)$$

- Herausrechnen des spannungsabhängigen Blindleistungsbedarfs der Leitungen ist möglich, wenn  $C$  bekannt:

$$Q_C(U) = U^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{Kabel}}$$

Quelle	$k_{pu}$	$k_{qu}$	$k_{qu}$ ohne C
Palm 2017	<b>1,460</b>	<b>0,910</b>	-
Lens 2022	1,603	1,186	-
Helmschrott 2025	0,759	0,808	-
Netz A, städtisch	<b>0,848</b>	0,497	<b>0,653</b>
Netz B, ländlich	<b>0,480</b>	0,872	<b>1,817</b>
Netz C, ländlich	<b>0,720</b>	-0,029	<b>0,815</b>

Lens 2022: H. Lens, G. Mitrentsis, H. Abele, J. Lehner und C. Schöll, „Measurement data based identification of the contribution of distribution networks to the self-regulating effect,“ in ETG/GMA-Fachtagung "Netzregelung und Systemführung", Leipzig, 2022.

Helmschrott 2025: R. Helmschrott, S. Seifried, T. Weinmann, R. Schuder, M. Kreissl, C. Steinhart und M. Finkel, „Untersuchung des spannungsabhängigen Verhaltens einer Netzgruppe auf Hoch-, Mittel-, und Niederspannungsebene anhand von Messdaten während des Betriebs,“ in Internationale Energiewirtschaftstagung, Wien, 2025.

- Ähnliches Verhalten wie in Literaturstellen  
( $U \uparrow \rightarrow P \uparrow, Q \uparrow$ )
- Abhängigkeit  $P$  von  $U$  hat deutlich abgenommen
- Abhängigkeit  $Q(U)$  streut stärker, ist aber im Mittel auch kleiner geworden
- Herausrechnen von  $C$  führt zu größeren  $k_{qu}$   
(Verhalten Lasten und Ortsnetz-  
Transformatoren)

Quelle	$k_{pu}$	$k_{qu}$	$k_{qu}$ ohne C
Palm 2017	<b>1,460</b>	<b>0,910</b>	-
Lens 2022	1,603	1,186	-
Helmschrott 2025	0,759	0,808	-
Netz A, städtisch	<b>0,848</b>	0,497	<b>0,653</b>
Netz B, ländlich	<b>0,480</b>	0,872	<b>1,817</b>
Netz C, ländlich	<b>0,720</b>	-0,029	<b>0,815</b>

Lens 2022: H. Lens, G. Mitrentsis, H. Abele, J. Lehner und C. Schöll, „Measurement data based identification of the contribution of distribution networks to the self-regulating effect,“ in ETG/GMA-Fachtagung "Netzregelung und Systemführung", Leipzig, 2022.

Helmschrott 2025: R. Helmschrott, S. Seifried, T. Weinmann, R. Schuder, M. Kreissl, C. Steinhart und M. Finkel, „Untersuchung des spannungsabhängigen Verhaltens einer Netzgruppe auf Hoch-, Mittel-, und Niederspannungsebene anhand von Messdaten während des Betriebs,“ in Internationale Energiewirtschaftstagung, Wien, 2025.

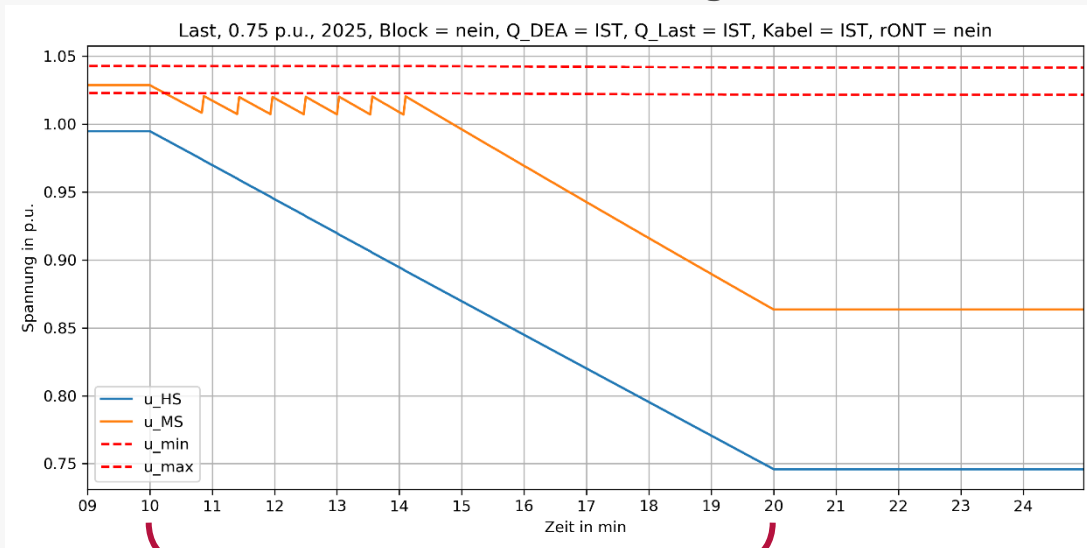
# 3. Simulationen im MS-Netz

- Implementierung von
  - Spannungsabhängigkeit der Lasten
  - Blindleistungs- und Abschaltverhaltens der Erzeugungsanlagen
  - Regionalszenarien (Prognose zur Entwicklung Last und Erzeugung bis 2045)
  - QDSL-Modell zum Transformator-Stufenregler (Zeitabhängigkeit und Verhalten)
- Vorbereitung der Untersuchungsszenarien:
  - Last- und Erzeugerszenario
  - Spannungsabsenkung auf 0,75 p.u. und –anstieg auf 1,15 p.u. mit 10-min-Rampe auf HS-Seite
  - Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren (rONT)
  - Verkabelung der MS-Netze
  - Verhalten der Prognose-Lasten:  $\cos(\varphi) = 1$  oder  $Q(U)$
  - Verhalten der DEA: IST-Kennlinien oder  $Q(U)$

# Einfluss der Blockierung auf die MS-Spannung

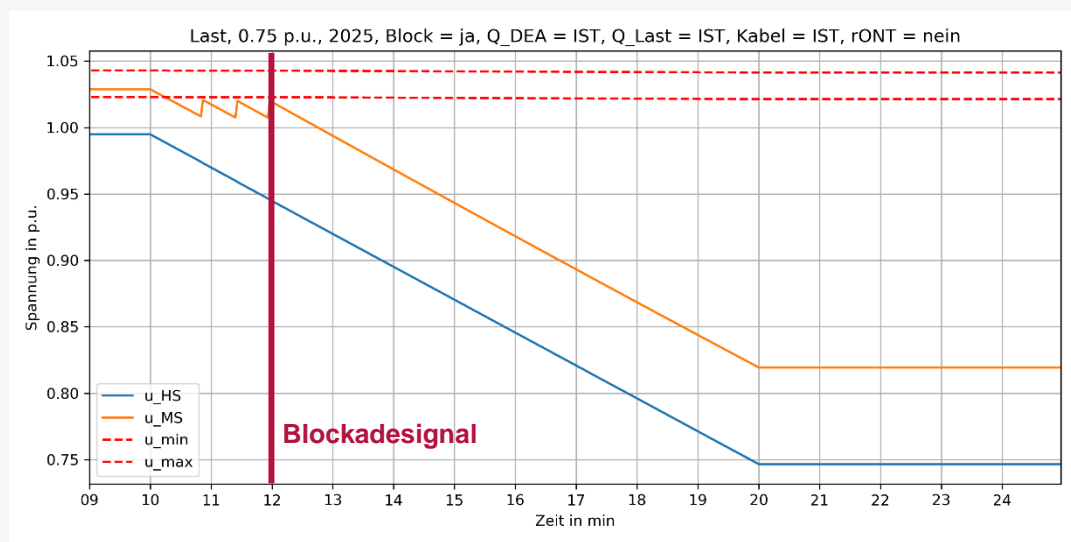
- **Ohne Blockierung:** Stufenregler kann  $U$  nicht auf ursprünglichen Wert halten, verfügbare Stufen werden ausgeschöpft, Spannungsband wird verlassen
- **Mit Blockierung:** wenige Stufen in 2 Minuten vor Blockade, Spannung sinkt wesentlich stärker ab

## Ohne Blockierung

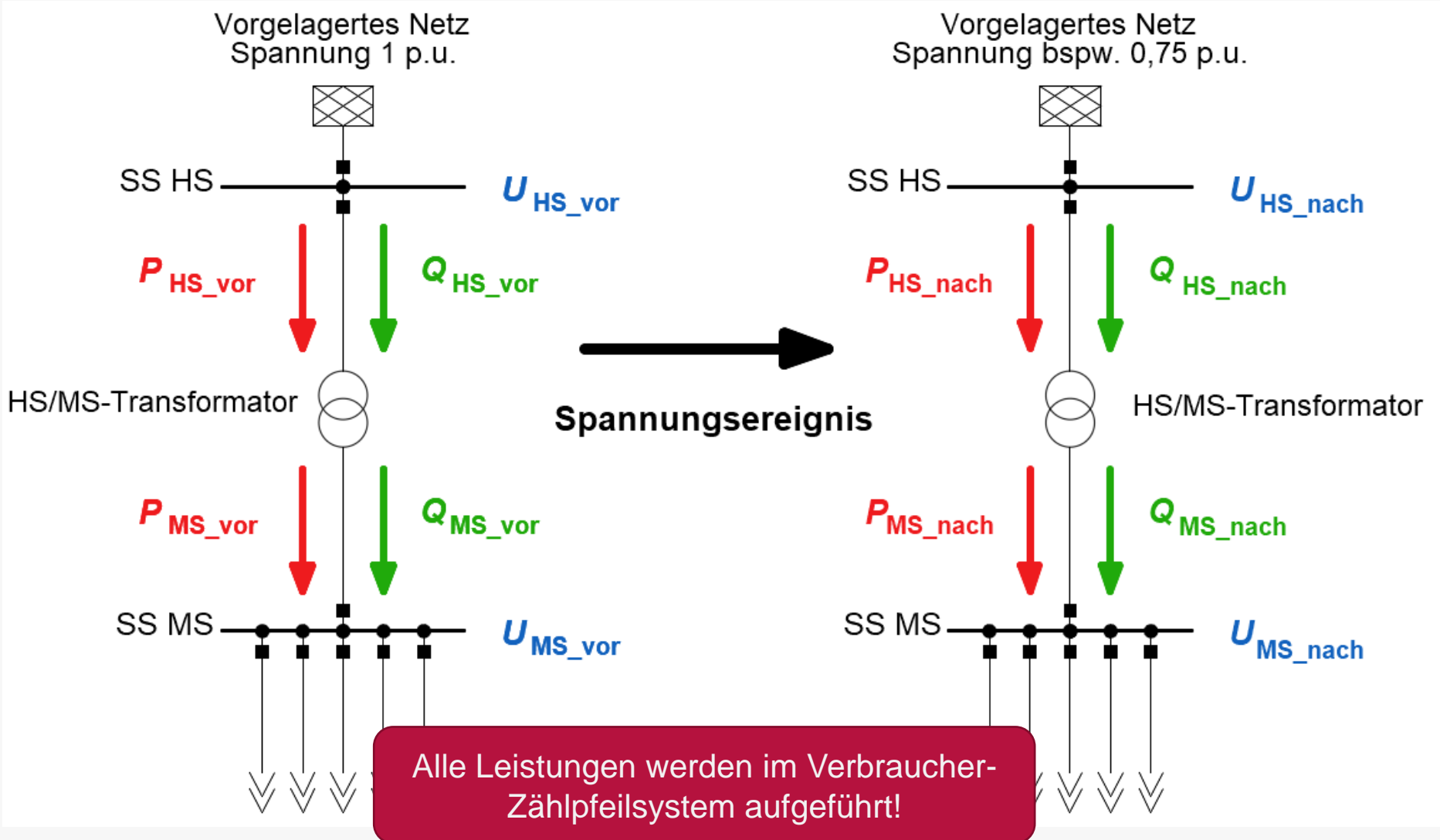


Spannungseignis

## Mit Blockierung



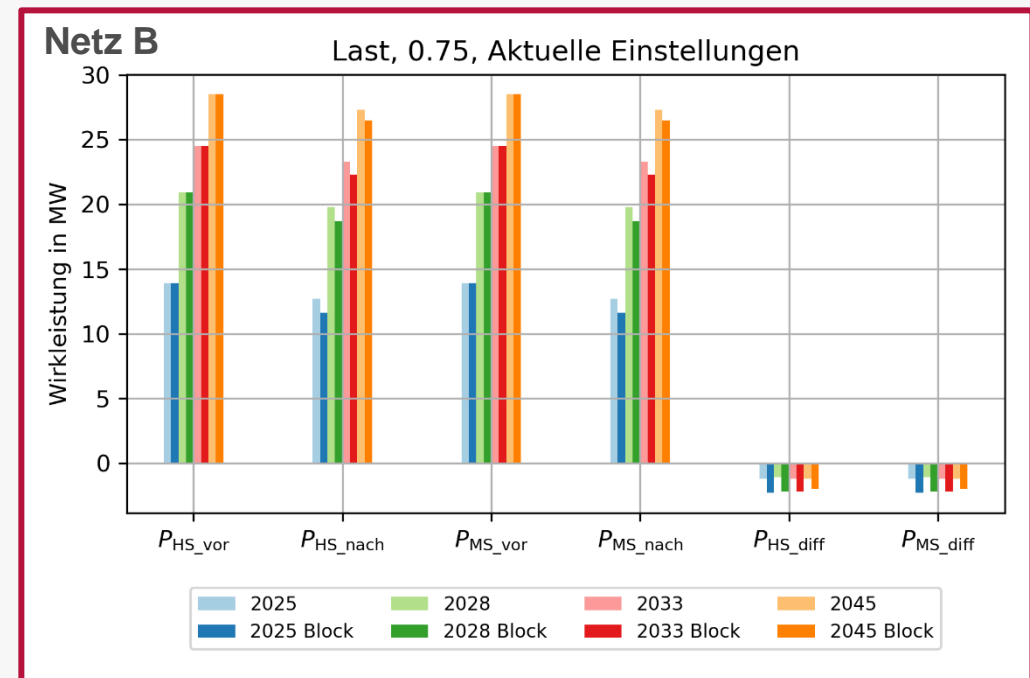
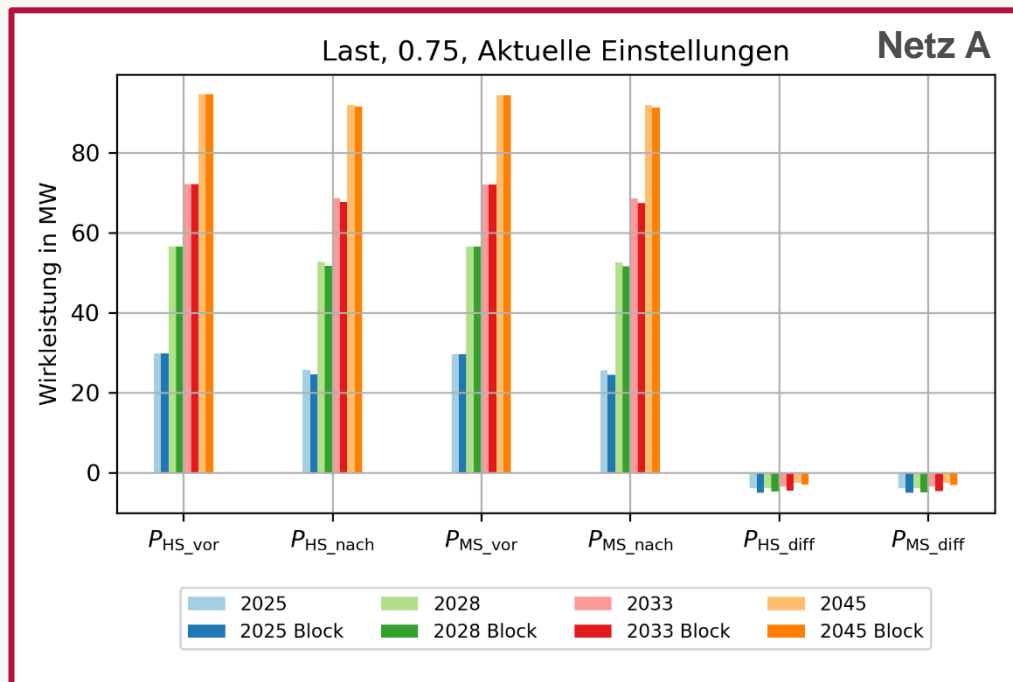
# Erläuterung der Untersuchungsgrößen



# Simulation - Regionalszenarien

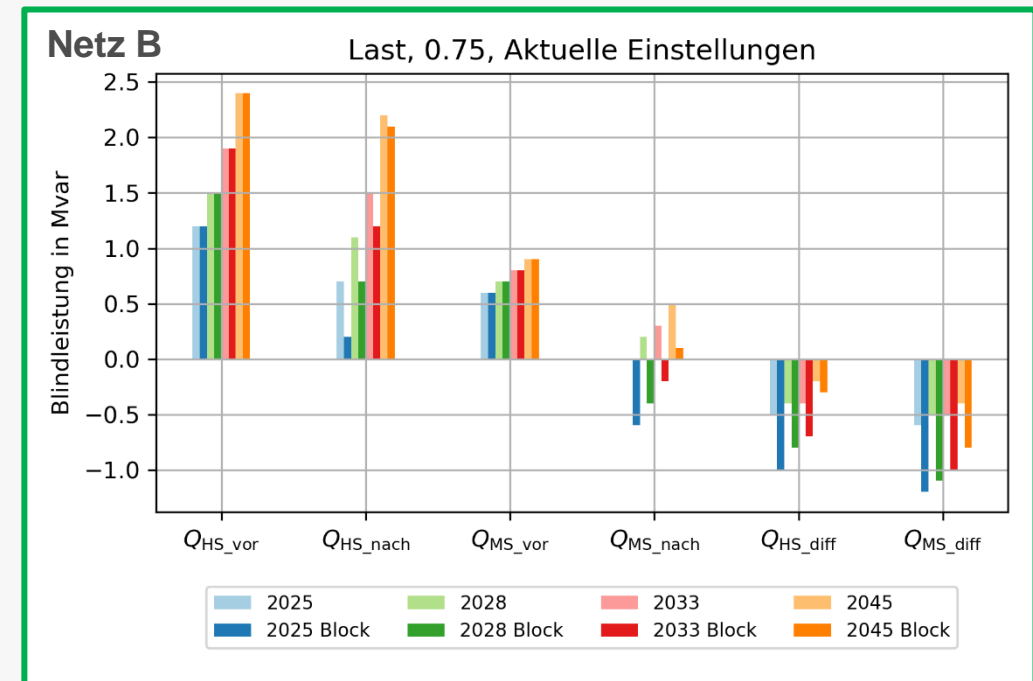
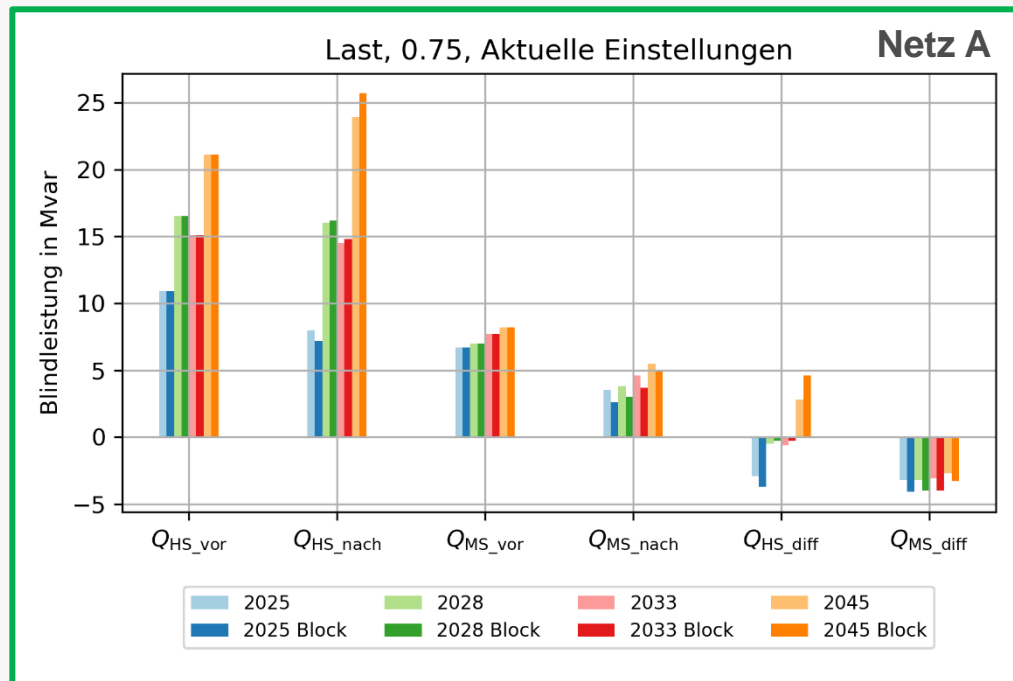
## Lastfall

- Spannung sinkt **mit und ohne Blockierung** ab
  - Spannung sinkt geringfügig ab, durch  $U$ -Abhängigkeit der Lasten sinkt Leistung etwas ab
  - Effekt über die Jahre absolut konstant, da neue Lasten (Emob+WP) weitestgehend spannungsunabhängig, Effekt nimmt relativ gesehen aber ab
- $P$  nimmt **mit Blockierung** etwas stärker ab, da die Spannung weiter abfällt



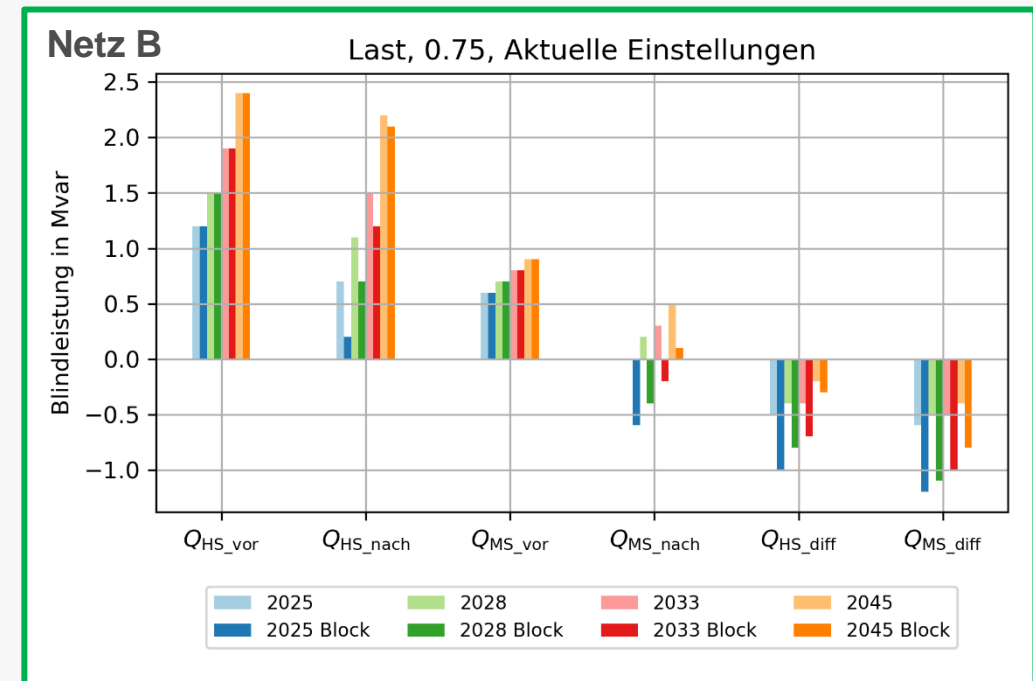
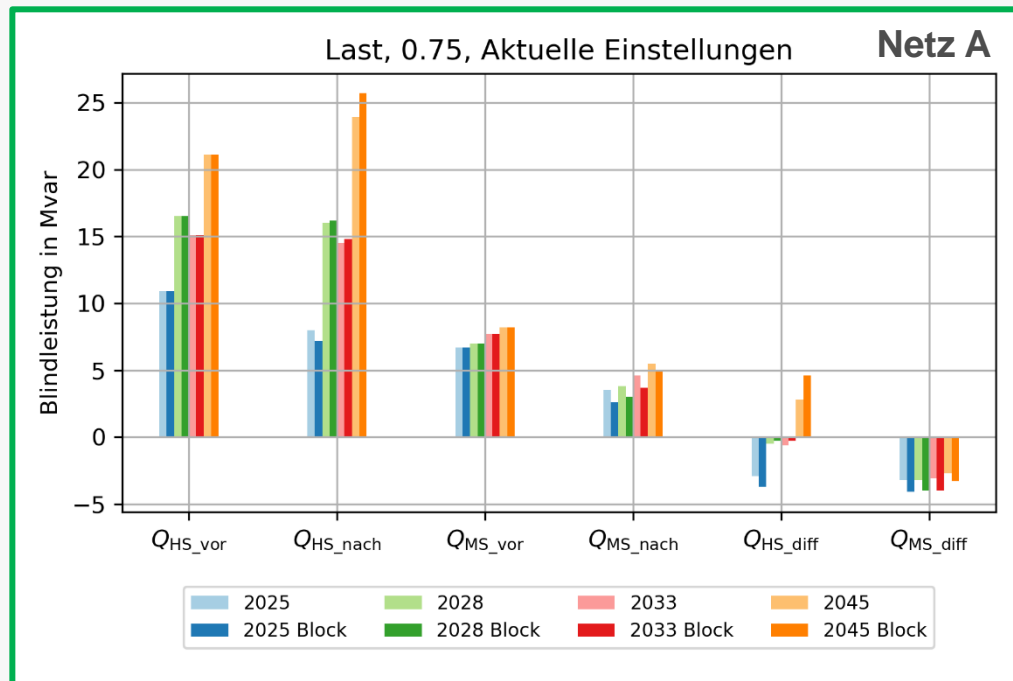
# Lastfall Blindleistung – Regionalszenarien – 0,75 p.u. (1)

- Großer Anstieg des Blindleistungsbedarfs im Zuge der Regionalszenarien (höhere Netz- und Trafoauslastung)
- Es treten drei teilweise gegenläufige Effekte auf, hier dominieren 1. und 2.:
  1.  $U$  sinkt  $\rightarrow$  Geringere induktive Blindleistungsaufnahme der spannungsabhängigen Lasten.
  2.  $U$  und damit auch  $P$  sinken  $\rightarrow$  Geringere induktive Blindleistungsaufnahme der Leitungen und Transformatoren, da durch sinkende Wirkleistungsaufnahme auch der fließende Strom und damit die Auslastung abnimmt.
  3.  $U$  sinkt  $\rightarrow$  Geringere kapazitive Blindleistungsaufnahme der Leitungen, da die kapazitive Ladeleistung abnimmt.

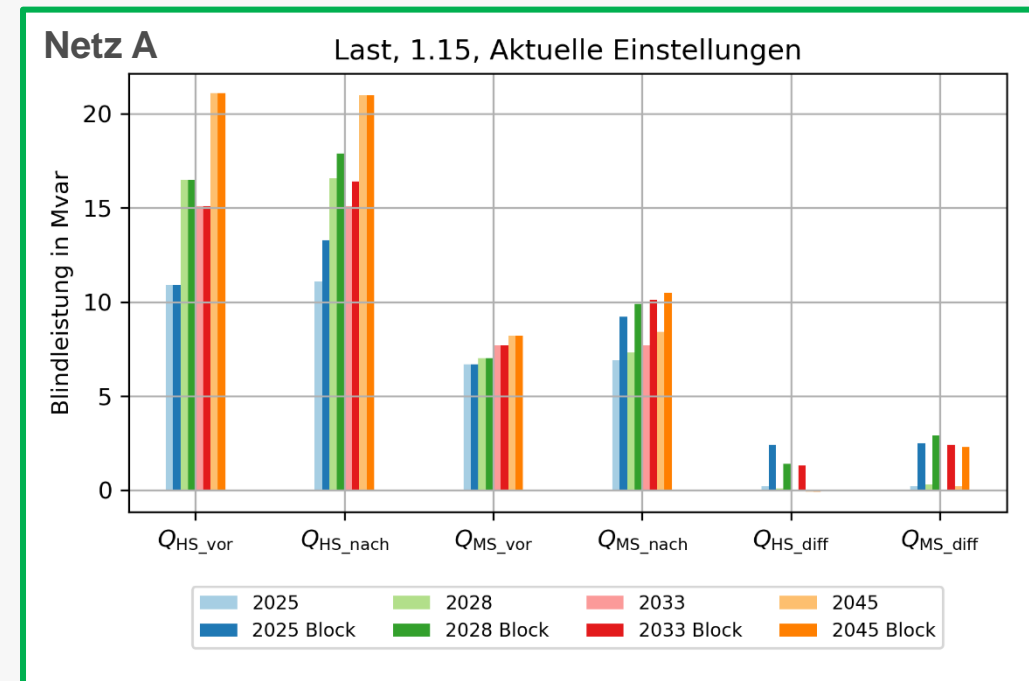
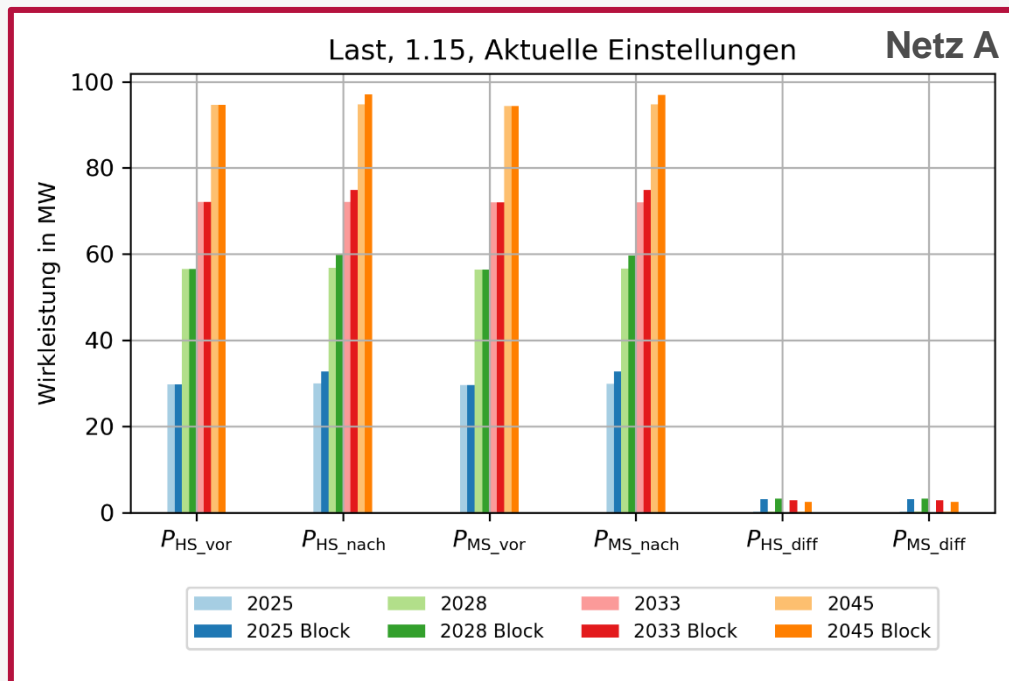


# Lastfall Blindleistung – Regionalszenarien – 0,75 p.u. (2)

- Q nimmt **mit Blockierung** etwas stärker ab (Netz „wirkt kapazitiver“), da Spannung weiter einbricht
- MS-seitig ist Effekt über die Jahre weitestgehend stabil, da neue Lasten  $U$ -unabhängig.
- HS-seitig wird Blindleistungsänderung über die Jahre immer „induktiver“, Ursache: Auslastung Trafo steigt nach  $U$ -Rampe stark, da viele neue Lasten mit  $P = \text{konstant}$  ( $U \downarrow \blacktriangleright I \uparrow$ ), kompensiert Reduktion der Blindleistung in früheren Jahren



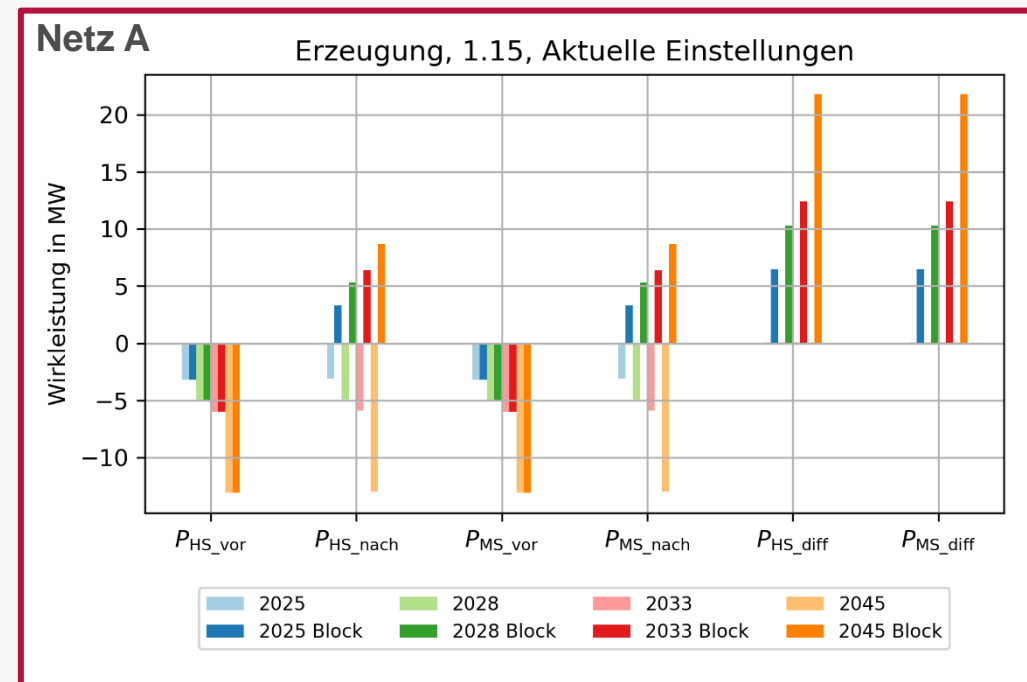
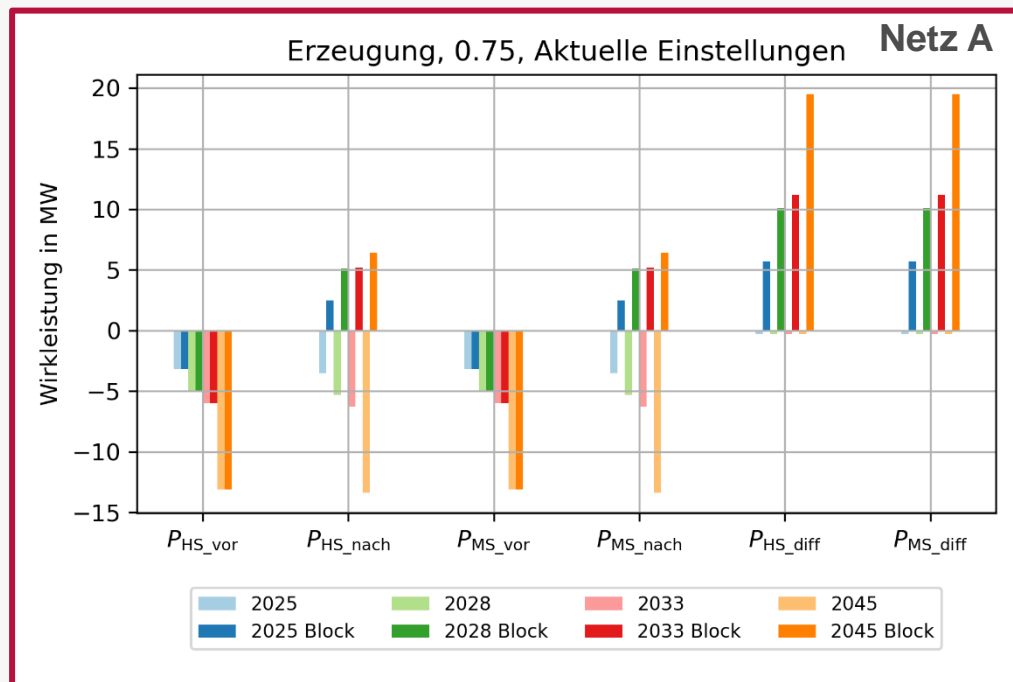
- **Durch Blockierung** wird Spannungsanstieg MS-seitig zugelassen
- Leistungsaufnahme der vorhandenen „konventionellen“ Last nimmt leicht zu
- Gleiche Effekte wie bei 0,75 p.u. nur mit anderer Richtung



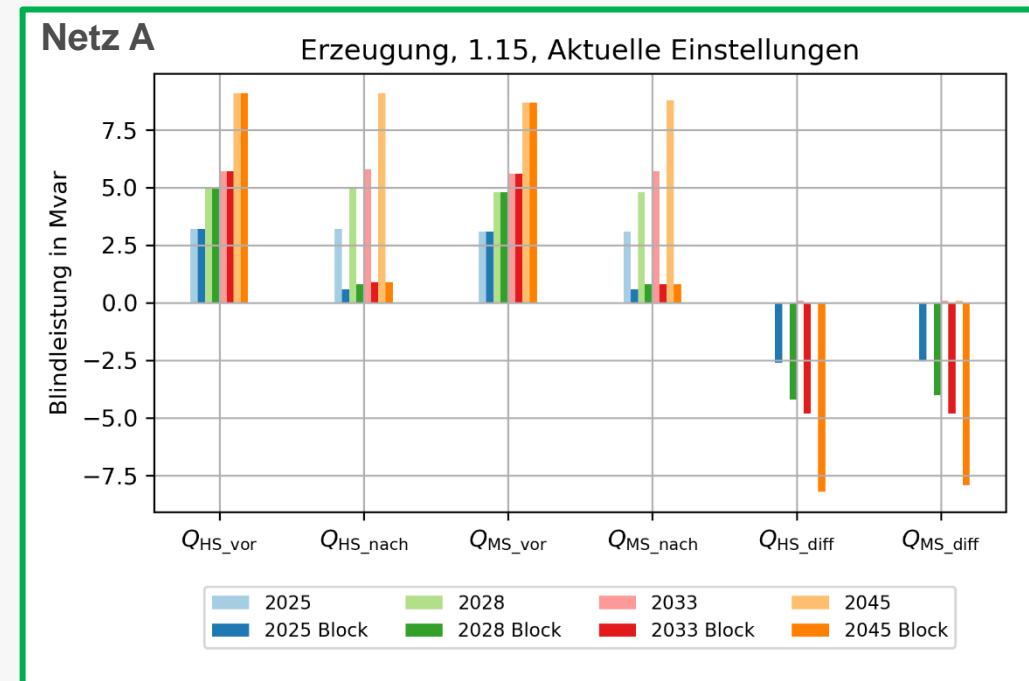
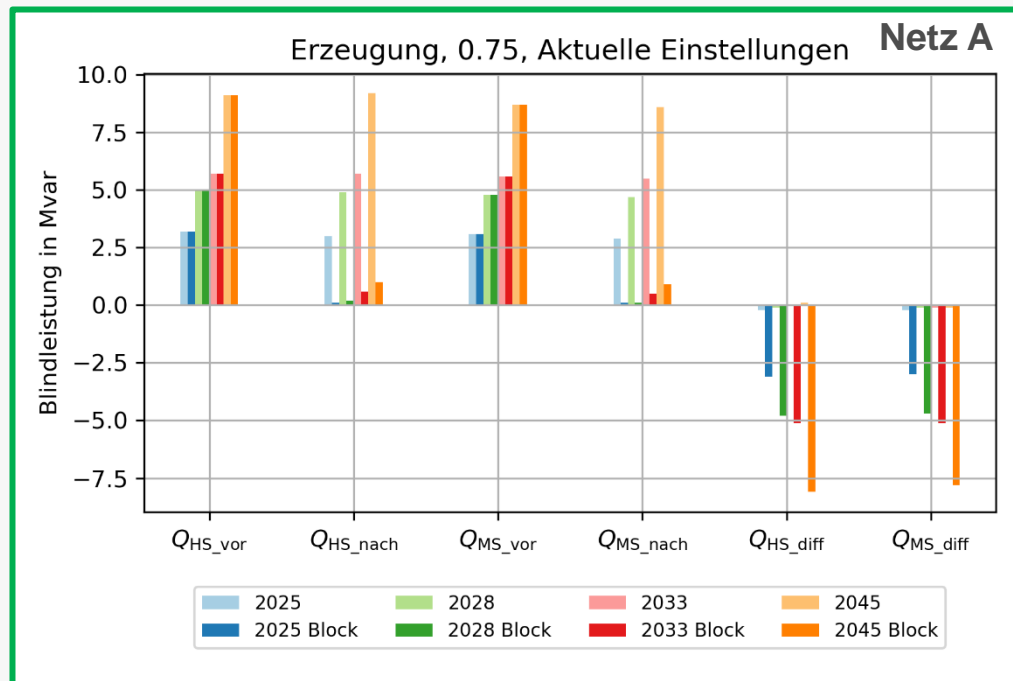
# Simulation - Regionalszenarien

## Erzeugerfall

- **Ohne Blockierung:** keine markante Veränderung, Spannung weitestgehend gestützt
- **Mit Blockierung** führt stärkerer Spannungsfall oder -anstieg zu Abschaltung einiger oder aller DEA  
( $U < 0,8$  p.u. und  $U > 1,15$  p.u.):
  - Wirkleistungsaufnahme steigt, da fast nur noch Last übrig
  - Städtisches Netz: kürzere Leitungen, alle DEA schalten ab
  - Ländliche Netze: längere Leitungen,  $U$  kann sich teilweise aufbauen, weniger DEA-Abschaltungen



- **Blockierung** führt zu stärkerem Spannungsfall oder -anstieg und damit Abschaltung von DEA, Netz „wird kapazitiver“, da induktive Blindleistung der Einspeiser wegfällt
- Bei Spannungsanstieg besonders kritisch, weil damit zusätzlich spannungsanhebendes Verhalten des Verteilnetzes

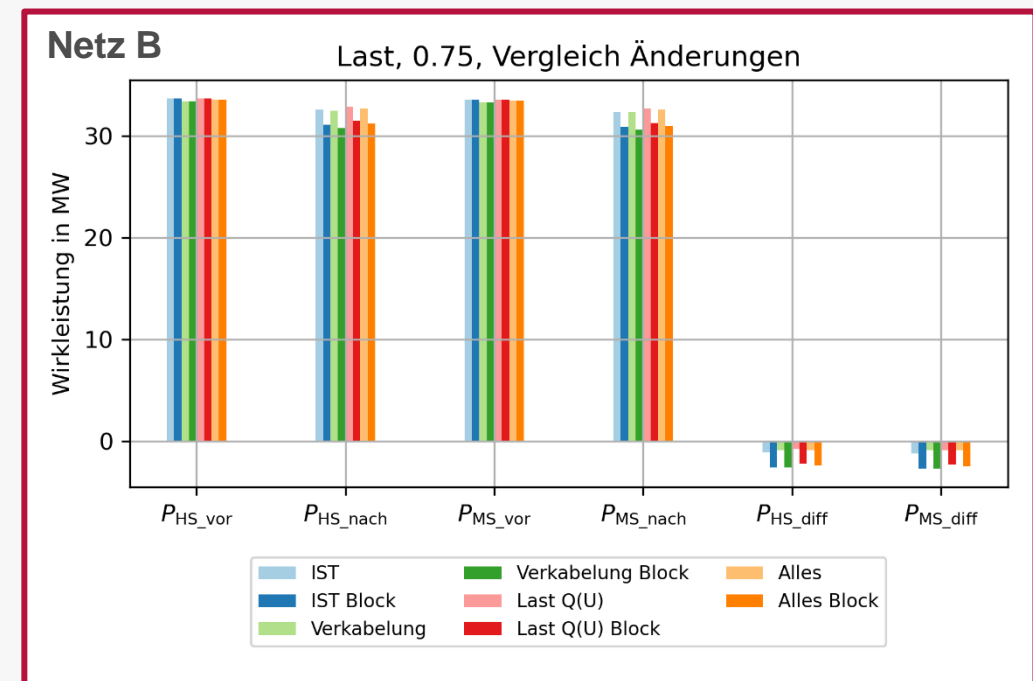
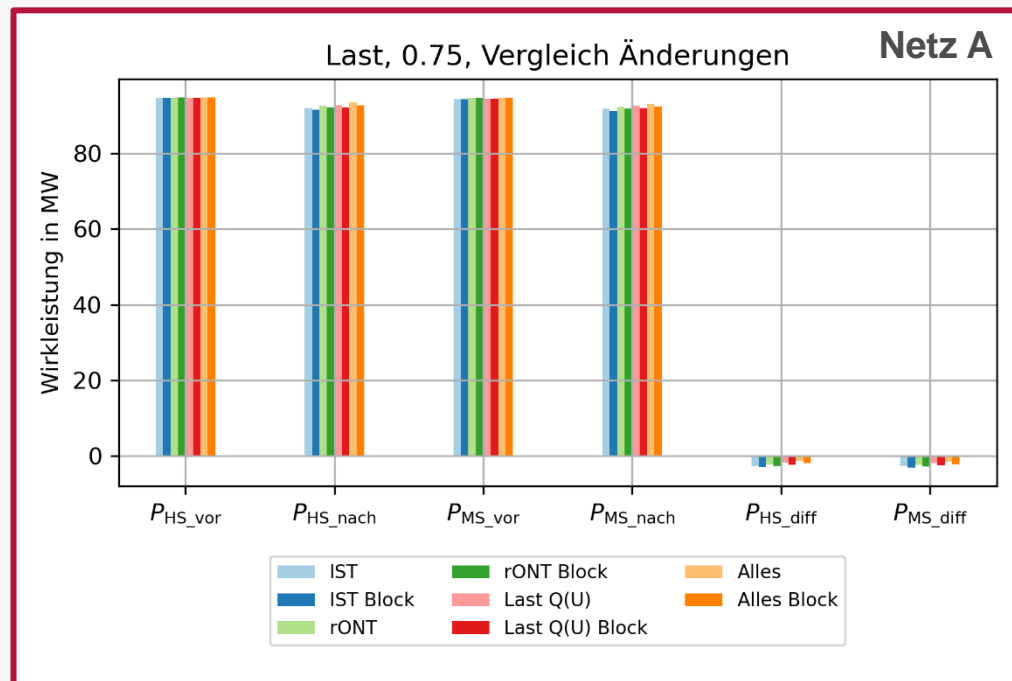


# Simulation - Einflussfaktoren

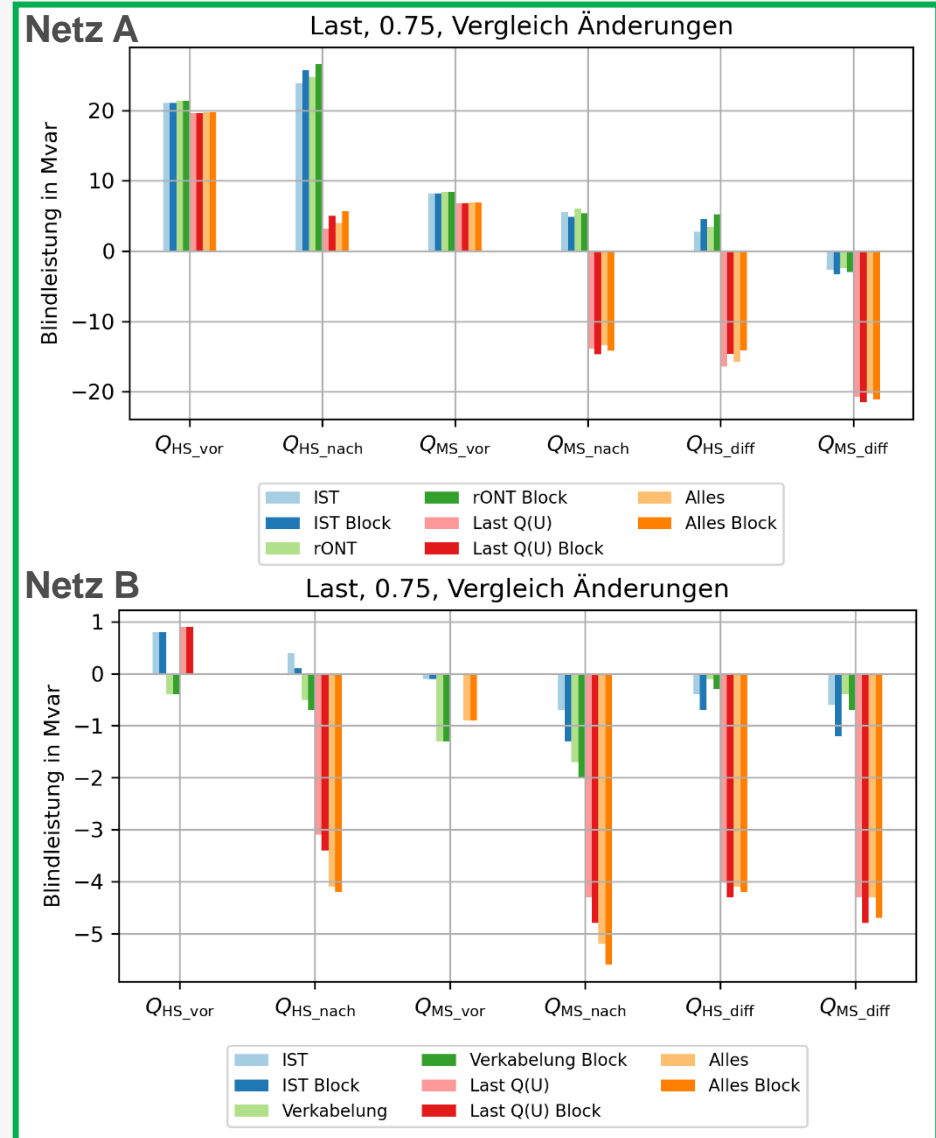
## Lastfall

# Lastfall Wirkleistung – Einflussfaktoren 2045 – 0,75 p.u.

- Einflussfaktoren für 2045 untersucht
- Generell zeigt sich, dass Einflussfaktoren im Lastfall nur marginalen Einfluss auf die Wirkleistung haben



- Einflussfaktoren:
  - **rONT (oben)**: Spannungsabsenkung wird um geringes Maß reduziert, sodass die Blindleistungsänderung MS-seitig mit und ohne Blockierung geringfügig kleiner ist.
  - **Verkabelung (unten)**: Netz vor Ereignis wesentlich kapazitiver, Blindleistung wird während  $U$ -Ereignis in geringerem Maße kapazitiver als im IST-Zustand.
  - **Last  $Q(U)$** : Zur Spannungsstützung wirken die Lasten kapazitiv, wodurch auch die Gesamtblindleistung des Netzes erheblich kapazitiver wird.



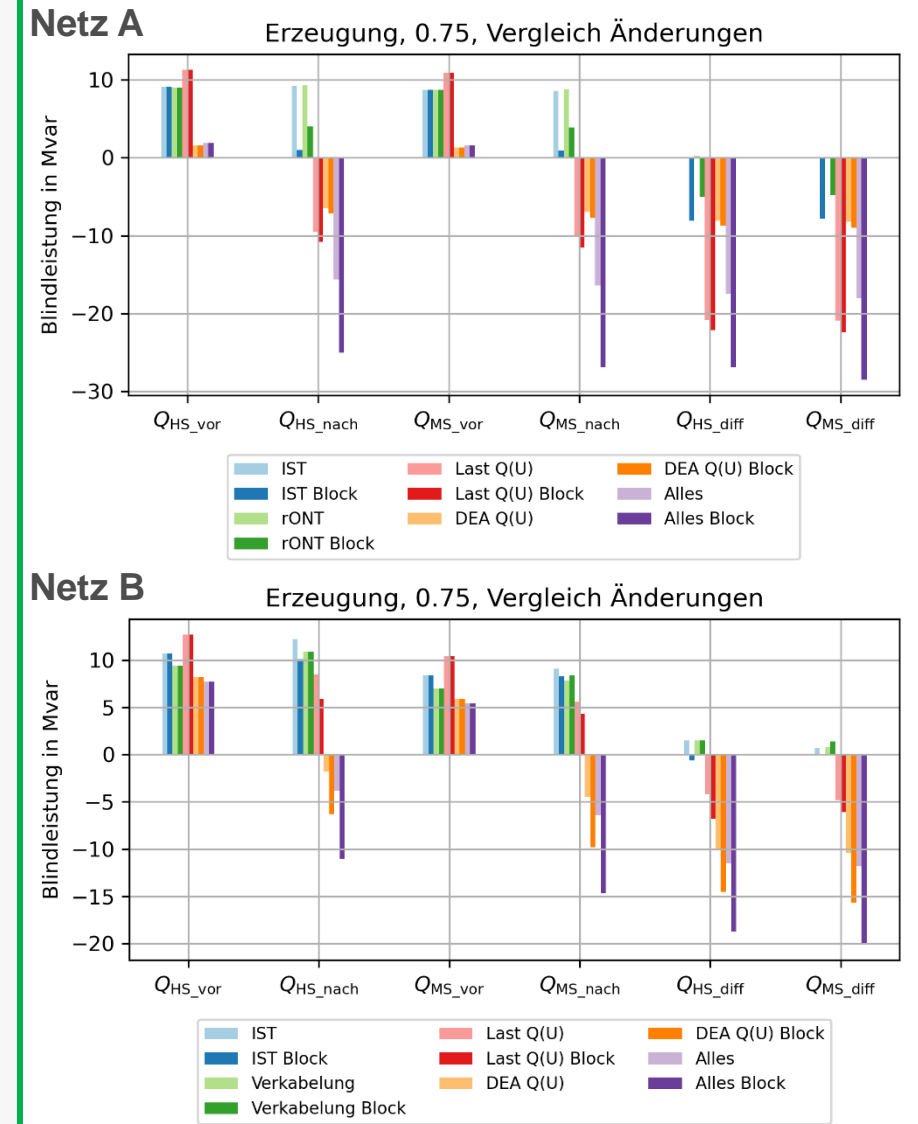
# Simulation - Einflussfaktoren

## Erzeugerfall

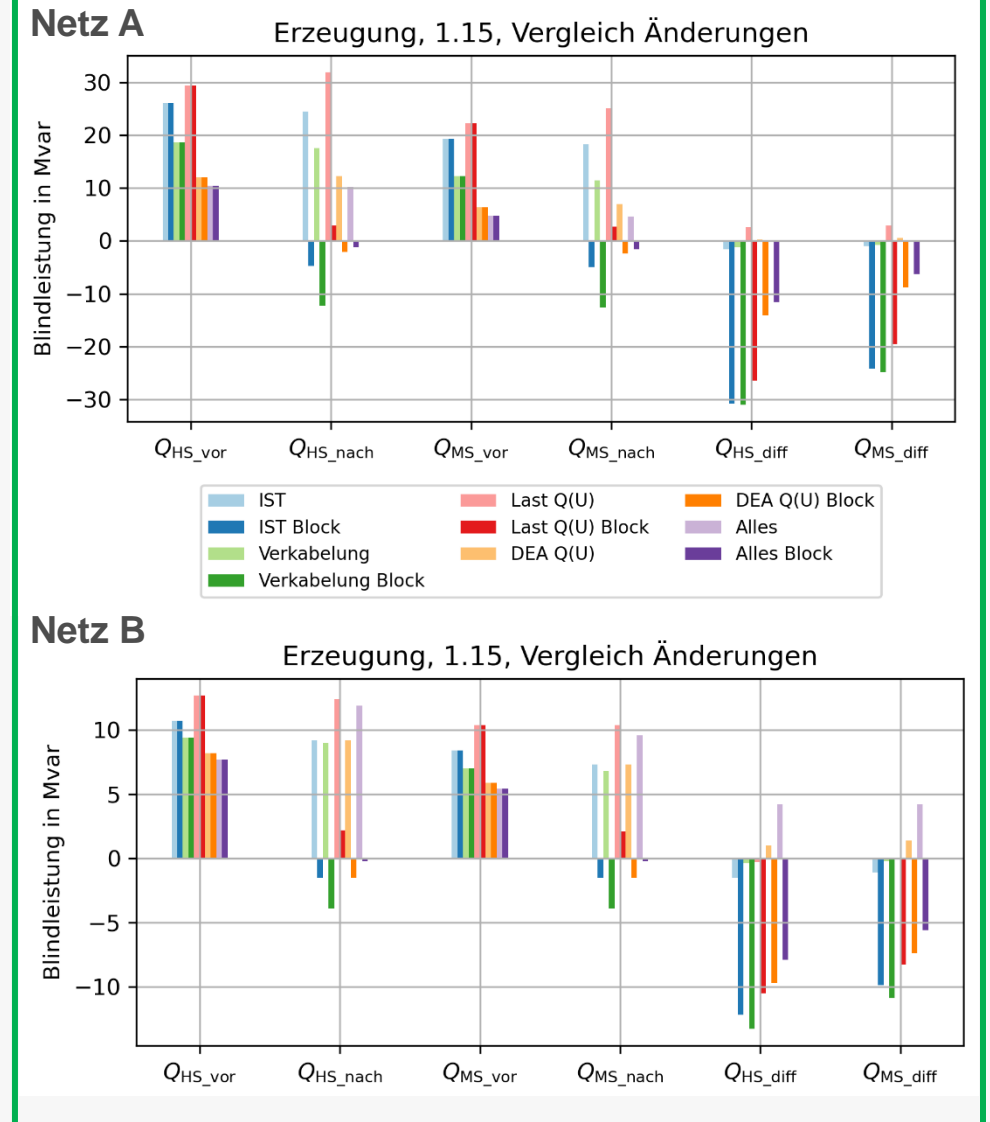
# Erzeugerfall Blindleistung – Einflussfaktoren 2045 – 0,75 p.u.



- **Durch Blockierung** trennen sich manche DEA durch  $U <$  vom Netz, Netz wird kapazitiver
- Einflussfaktoren:
  - **rONT (oben)**: Spannungsabsenkung wird um ein geringes Maß reduziert, sodass in NS weniger DEA abschalten.
  - **Verkabelung (unten)**: Einfluss der Kabel dominiert leicht, bei Spannungsabsenkung sinkt deren Ladeleistung, dadurch verhält sich Netz induktiver
  - **Last Q(U)**: Im Zuge der Spannungsabsenkung wirken Lasten kapazitiver um Spannung zu stützen, verhindern mitunter DEA-Abschaltung (insbesondere im städtischen Netz)
  - **DEA Q(U)**: DEA wirken im Zuge der Spannungsabsenkung kapazitiv um Spannung zu stützen, Abschaltung von DEA wird verhindert.



- **Durch Blockierung** grundlegend kapazitiveres Verhalten nach Spannungsanhebung durch Abschaltung zahlreicher DEA
- Einflussfaktoren:
  - **Verkabelung:** Kein wesentlicher Einfluss
  - **Last  $Q(U)$ :** Spannungssenkendes Verhalten genügt nicht um Abschaltung von DEA zu verhindern (Enge Schutzgrenze mit  $U > 1,1$  p.u.)
  - **DEA  $Q(U)$ :** Kann nur in manchen Netzen teilweise Abschaltung von DEA verhindern, Problem: Totband liegt bereits bei relativ hoher Spannung



# 4. Zusammenfassung

## Elektrische Lasten

- In aktuellen Verteilnetzen lässt sich nach wie vor Spannungsabhängigkeit der Lasten (und Ortnetz-Transformatoren) erkennen, die induktives Verhalten nahelegt
- Ermittelte Lastmodell-Parameter können in zukünftigen Untersuchungen eingesetzt werden

## Blockierung des Transformator-Stufenreglers

- Führt aktuell im reinen Lastfall *meist* noch zu einer Anpassung der Blindleistung, die stabilisierend sein kann
- Wird perspektivisch durch leistungskonstante Lasten und Verkabelung tendenziell zum Gegenteil führen
- Würde in vielen Fällen bereits jetzt zur Abschaltung von DEA infolge Verletzung der Spannungsgrenzen führen:
  - Unkontrollierte Abschaltung von Einspeiseleistung
  - Trennung einer erheblichen induktiven Leistung. Folge bei Spannungsabsenkung und -anhebung ist ein kapazitiveres Verhalten des Netzes.

## Blindleistungsverfahren für Erzeugungsanlagen

- Häufige Verfahren  $\cos(\varphi)(P)$  und konstanter  $\cos(\varphi)$  aufgrund spannungssenkender Wirkung im Fall von Spannungsabsenkungen nachteilig und unflexibel
- $Q(U)$ -Kennlinie hat sich in Untersuchungen als vorteilhaft erwiesen:
  1. Es konnte immer das Blindleistungsverhalten erzielt werden, welches am günstigsten für die Blindleistungsbereitstellung ist (Spannungsabsenkung  $\rightarrow$  kapazitiv, Spannungsanhebung  $\rightarrow$  induktiv)
  2. In vielen Fällen Stabilisierung von  $U$  im MS-Netz, sodass Abschaltung der DEA vermieden werden konnte.
- Für den Fall des Spannungsanstiegs möglicherweise auch Einsatz einer Kennlinie der Blindleistung mit Spannungsbegrenzungsfunktion sinnvoll:
  - Blindleistungs-Arbeitspunkt bereits im Normalbetrieb bei Referenzspannung im untererregten Betrieb (leicht induktives Verhalten)
  - Wirksamere Reaktion auf Anstieg der Spannung und auch im normalen Betrieb wird von DEA verursachte Spannungsanhebung reduziert.



**POWERFACTORY**

**Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!**

**Dr.-Ing. Sebastian Palm**  
s.palm@digsilent.de

**POWER SYSTEM SOLUTIONS**  
MADE IN GERMANY