



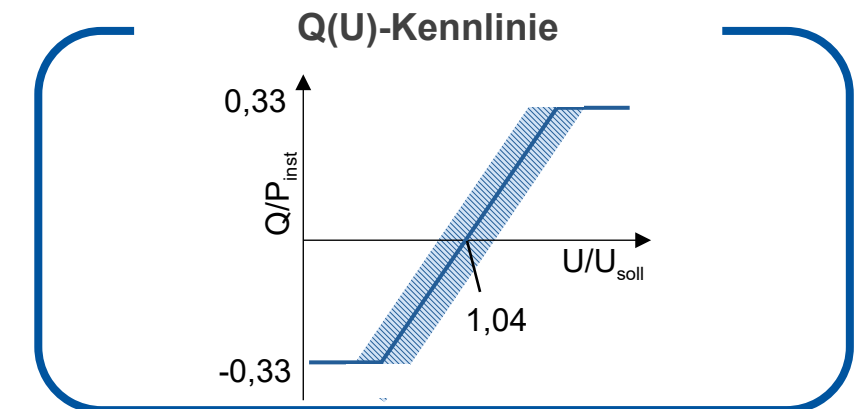
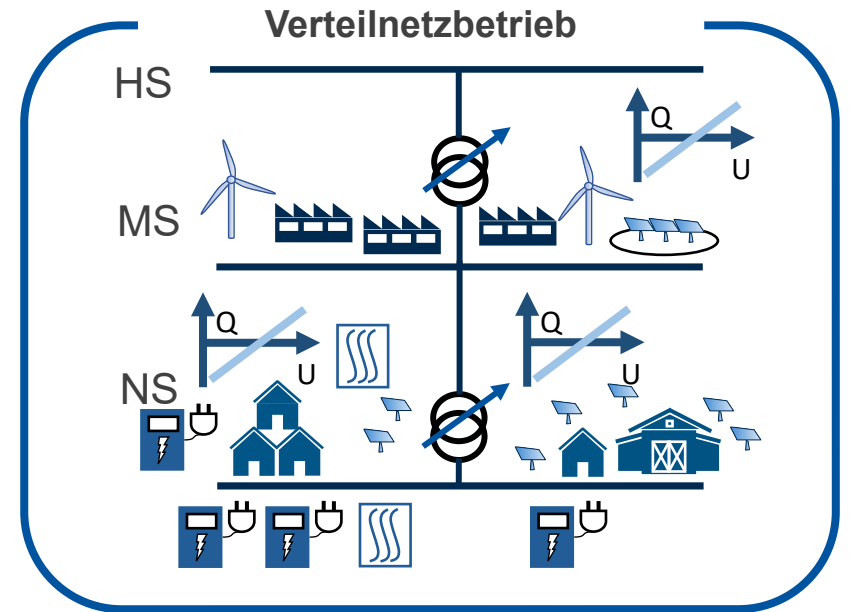
# Modell für Niederspannungsnetze mit aktiver Spannungsregelung für Langzeitspannungsstabilitätsanalysen in Verteilnetzen

Vortrag bei der EnInnov 2024

Name: Robert Schmidt, M.Sc.

# Einleitung & Motivation

- Historisch wenig Beobachtung und Steuerung in den Mittel- und Niederspannungsnetzen (MS- und NS-Netze)
  - Planbarer Lastgang
  - Keine Erzeugung
- Zunehmend volatiler Netzbetrieb in den MS- und NS-Netzen
  - Weiterhin steigende EE-Einspeisung (PV und Wind), Zubau überwiegend im Verteilnetz
  - Elektrifizierung von Verbrauch der Bereiche Wärme und Mobilität (hohe Lastspitzen)
- Unvorhergesehene Netzzustände möglich
- Sicherung der **Spannungshaltung/-stabilität** notwendig
  - Neue Maßnahmen für bessere Steuerung der Spannung
  - Q(U)-Regelung als vorteilhaftes Konzept

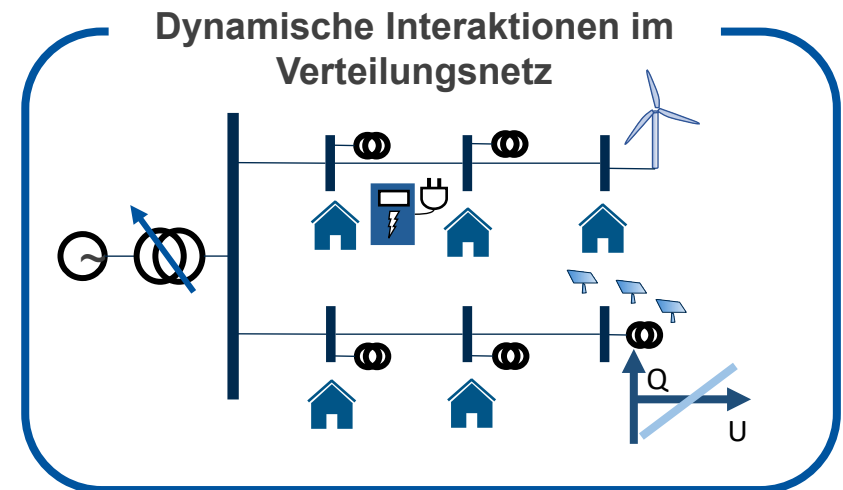
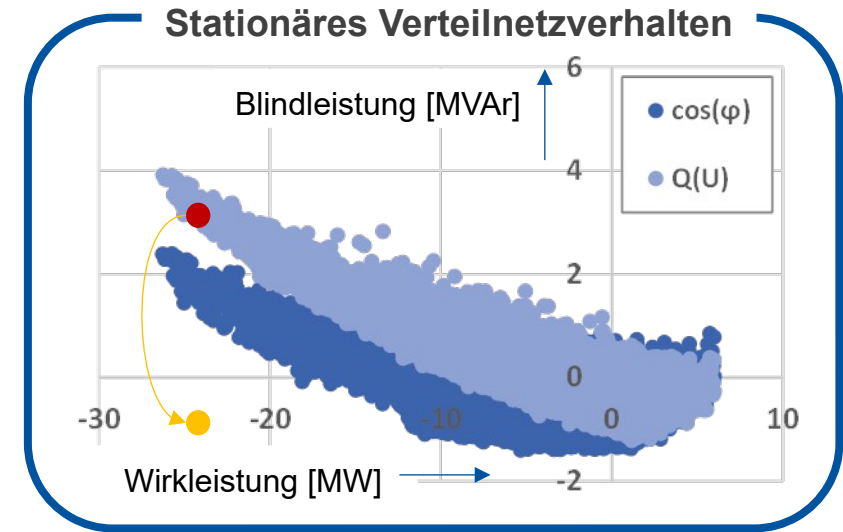


Herausforderung bei der Integration von EE-Anlagen und neuartigen Verbräuchen für die Spannungshaltung und -stabilität

# Einleitung & Motivation

- Spannungshaltung in der MS- und NS-Netzen ändert sich
  - Vorzugslösung  $Q(U)$ -Kennlinie  $\rightarrow$  Veränderung des Netzverhaltens
- Wachsend **spannungsabhängiges (=aktives)** Verhalten der MS- und NS-Netze
  - Stationärer Blindleistungsaustausch verändert sich je nach Betriebssituation
  - Schnelle Änderung der Betriebssituation  $\rightarrow$  dynamische Reaktion des Verteilnetzes
  - Verhalten NS-Ebene hat Rückwirkung auf die Spannung im MS-Netz
- Herausforderungen für die Netzplanung von MS- und NS-Netzen
  - Berücksichtigung des spannungsabhängigen Verhaltens der Anlagen
  - Berücksichtigung der Volatilität von Verbrauch und Erzeugung
  - Derzeit keine Prüfung des Zeitverlaufs der Spannung im Rahmen einer Betriebssimulation
  - Bei starker Volatilität im Sekunden- bis Minutenbereich nicht mehr gültig
  - Wechselwirkungen zwischen MS- und NS-Netzen sind zu berücksichtigen

In der Netzplanung von MS- und NS-Netzen muss zukünftige Spannungshaltung abgebildet werden



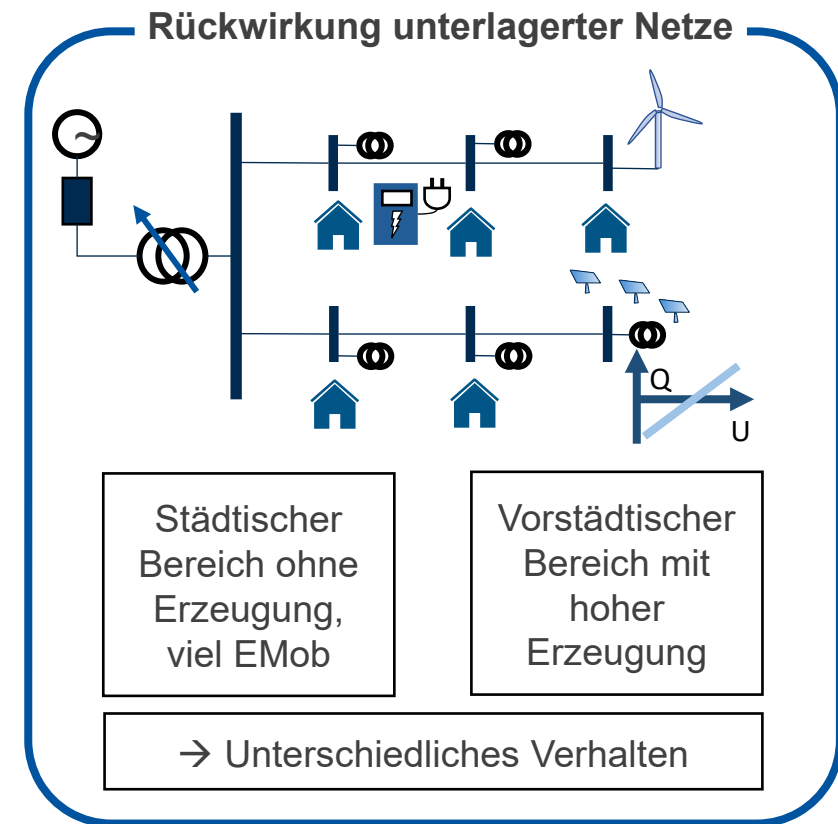
# Einleitung & Motivation

## Randbedingungen und Prämissen für Untersuchungen in MS

- Spannung überlagerter Netze ist höheren Schwankungen unterworfen
- Kurzschlussleistung sinkt →  $dU/dQ$  Sensitivität steigt
- Belastungssituation der MS- und NS-Netze ist stark veränderlich
- $Q(U)$ -Regelung greift neben HS/MS Trafo in die Spannungshaltung ein
- Wechselwirkungen MS/NS bzw. Rückwirkung von NS auf MS

## Wichtige Anforderungen an die Netzplanung

- Berücksichtigung hoher Gradienten der Erzeugung und Last
- Berücksichtigung von Regelungen, möglicherweise an jedem Netzknoten
- Berücksichtigung möglicher Wechselwirkungen mit dem HS/MS Trafo
- Modellierung des Verhaltens von Niederspannungsnetzen und -anlagen



Modell für Niederspannungsnetze mit aktiver Spannungsregelung

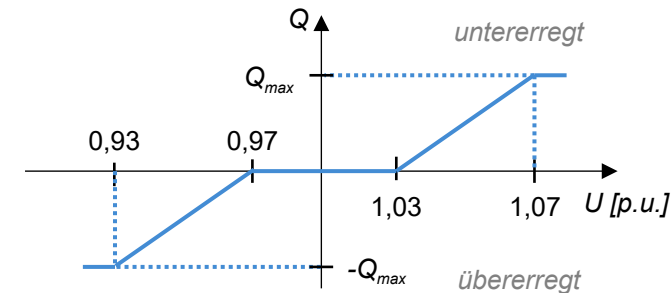
## Blindleistungsbereitstellung in der Niederspannungsebene

- DEA und neuartige Verbraucher stellen ein nutzbares Potential für die lokale Spannungshaltung dar
- Anwendungsregel „Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“ (VDE-AR-N 4105)
- Vorgabe unterschiedlicher Verfahren zur Blindleistungsregelung durch den Verteilnetzbetreiber möglich
- **Dynamisches PT1-Reglerverhalten** mit der Vorgabe  $3\tau = 10 \text{ s}$

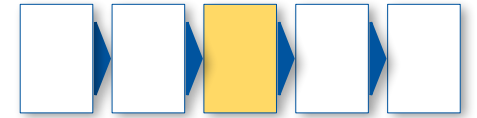
## Verfahren zur Blindleistungsbereitstellung

- Fester Verschiebungsfaktor  $\cos \varphi$ 
  - $S \leq 4,6 \text{ kVA}$ :  $\cos \varphi = 0,95_{\text{untererregt}} \dots \cos \varphi = 0,95_{\text{übererregt}}$
  - $S > 4,6 \text{ kVA}$ :  $\cos \varphi = 0,9_{\text{untererregt}} \dots \cos \varphi = 0,9_{\text{übererregt}}$
- Wirkleistungskennlinie  $\cos \varphi(P)$
- Spannungs-Blindleistungskennlinie  $Q(U)$

Standard-Q(U)-Kennlinie gemäß VDE-AR-N 4105

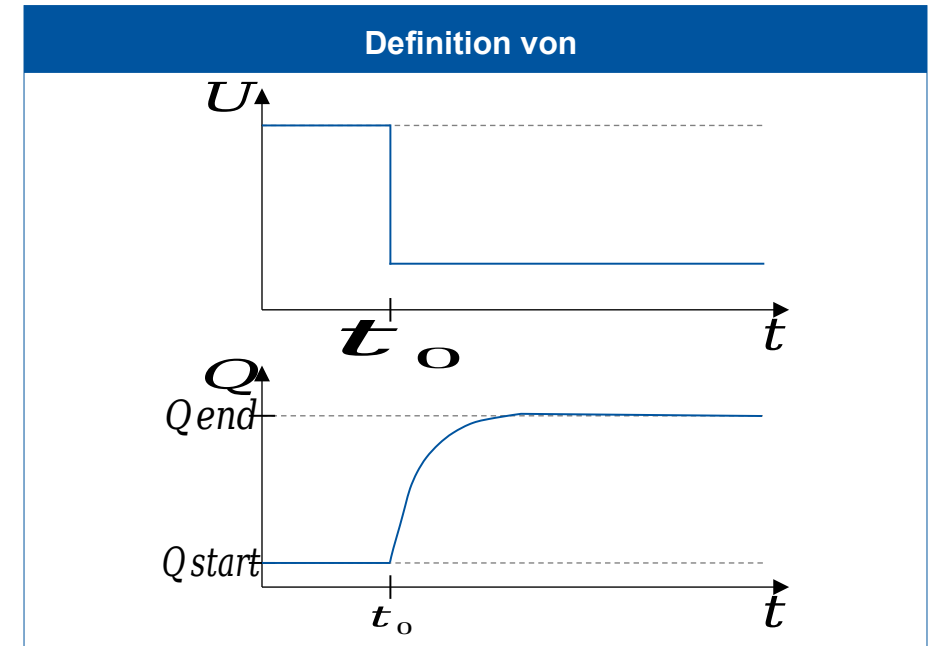


**Q(U)-Regelung als einziges Verfahren relevant für die dynamische Modellierung aufgrund der spannungsabhängigen Blindleistungsbereitstellung im Sekunden- und Minutenbereich**

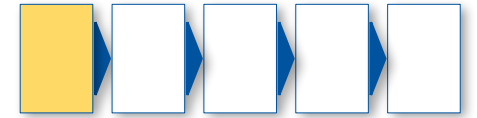


### Beispielhafte Zeitverläufe

- Blindleistungsendwert im eingeschwungenen Zustand zur Bewertung des Blindleistungsflusses am NVP
- **Verschiedene Spannungssprünge**: Bewertung von in Abhängigkeit der Spannungsänderungen
- **Netzausdehnung**: Bewertung von in Abhängigkeit verschiedener Skalierungsfaktoren
- **Blindleistungsbereitstellungsverhalten**: Bewertung der Blindleistungseinspeisungen der Anlagen im gesamten Zeitverlauf
- Wechselwirkende Effekte:

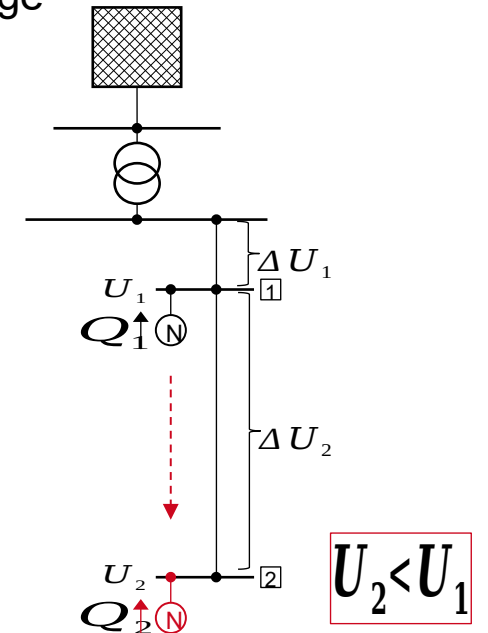


**Anwendung der Auswertungsergebnisse für die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Ersatznetzmodellierung**

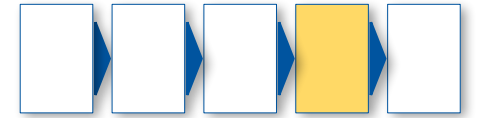


### Potentielle Einflussfaktoren auf das Blindleistungsverhalten des Niederspannungsnetzes

- Plötzliche Änderung der Lastflusssituation abgebildet über positive und negative Spannungssprünge
  - Unterschiedliche Einflüsse auf den Blindleistungsbedarf des Netzes aufgrund der quadratischen Abhängigkeit zwischen Leistung und Spannung
- Netzausdehnung
  - Abhängigkeit der Q(U)-Regelung von einem größeren Spannungsabfall, der durch die Erhöhung der elektrischen Distanz auf den Leitungen auftritt
- Blindleistungsbereitstellungsverhalten der Netzeinspeisungen
  - 1) Durchdringung der Q(U)-Regelung: Wechselwirkende Effekte der Blindleistungsregelungen untereinander bei unterschiedlicher Durchdringung
    - Wechselwirkende Effekte: Gegenseitige Beeinflussung der Blindleistungseinspeisungen
  - 2) Entfernung zum Netzverknüpfungspunkt (NVP): Erhöhte Blindleistungsbereitstellung bei entfernterer Positionierung

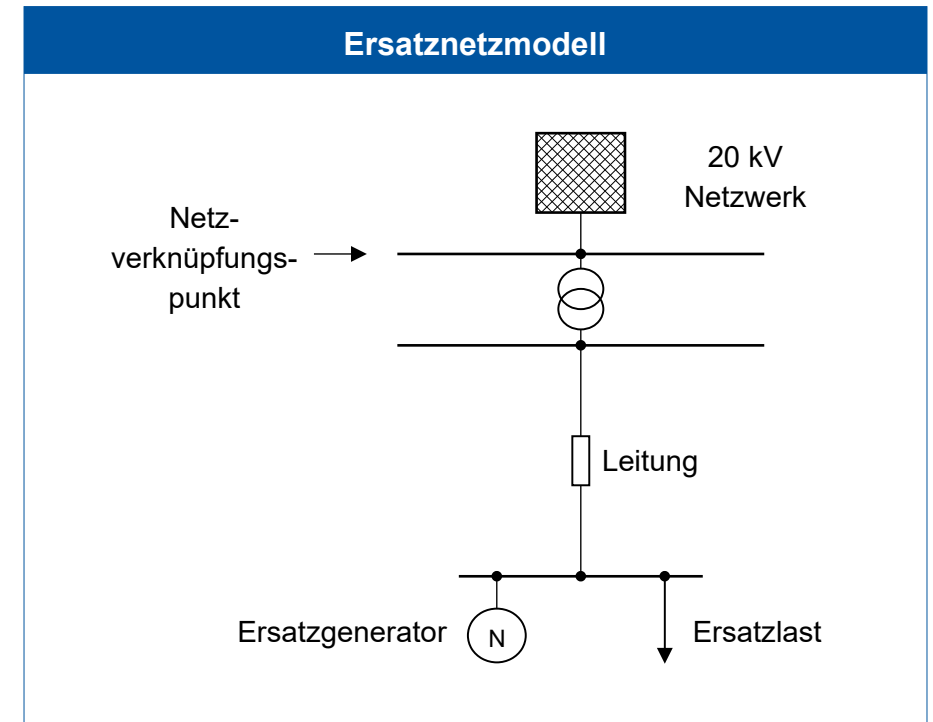


**Verschiedene Spannungssprünge, die Netzausdehnung und das Blindleistungsbereitstellungsverhalten der einspeisenden Anlagen sind relevante Einflussfaktoren**



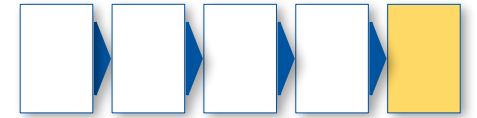
### Ansatz für die Ersatznetzmodellierung

- Ansatz Grey Box Modellierung in Anlehnung an bereits für das ÜN durchgeführte Arbeiten
- Realisierung der generischen Ersatznetzmodellierung basierend auf Vorab-Simulationen
- Ergebnis der Vorab-Simulationen
  - Vollständige Aggregation zu Ersatzgenerator und Ersatzlast, da nur ein NVP im Niederspannungsnetz
  - Ersatzleitung bzw. Äquivalente Reaktanz durch Aggregation aller Reaktanzen
- Validierung des Ersatzmodells



**Ausführen der dynamischen Simulation mit dem modellierten Ersatznetz und anschließende Bewertung**





### Validierungsverfahren

- Validierung der hergeleiteten Ersatznetzmodellierung anhand detaillierter Simulationen verschiedener NNFs und der Verwendung eines alternativen Netzes
- Auswertung anhand der Berechnung des absoluten und relativen Modellierungsfehlers
- Reduktion des Rechenaufwandes durch die Auswahl von NNFs anhand eines Clusterverfahrens in Anlehnung an die K-Means-Clusteranalyse

#### Berechnung der Modellierungsfehler

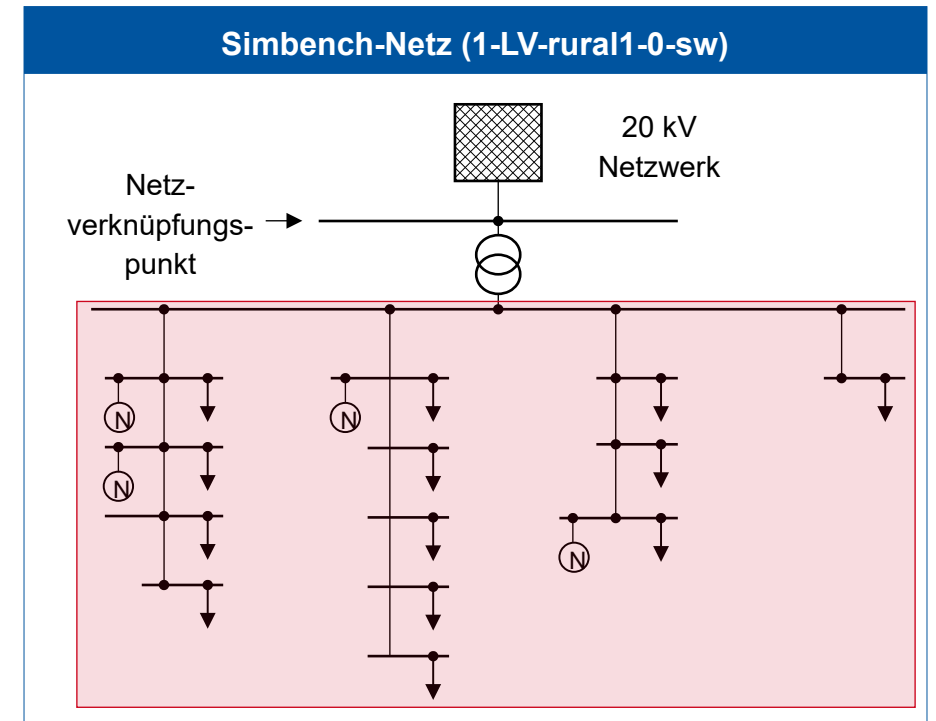
$$F = Q_{NVP,ON} - Q_{NVP,EN} [kVAr]$$

$$f = \frac{Q_{NVP,ON} - Q_{NVP,EN}}{Q_{NVP,ON}} \cdot 100 [\%]$$

**Untersuchung der Eignung der hergeleiteten Ersatznetzmodellierung für die Abbildung des Einspeiseverhaltens in Niederspannungsnetzen**

### Eingangsdaten

- Ländliches Niederspannungsnetz aus der Simbench-Datenbank
  - Strahlennetz
  - Nennspannung 0,4 kV
  - 20 kV/0,4 kV Transformator (160 kVA)
  - 14 Knoten
  - 4 Netzeinspeisungen (ca. 160 kW)
  - 13 Lasten (80 kW)
- Netznutzungsfälle des Jahres 2016 im Viertelstundentakt
- Standard-Q(U)-Kennlinie aus VDE-AR-N 4105

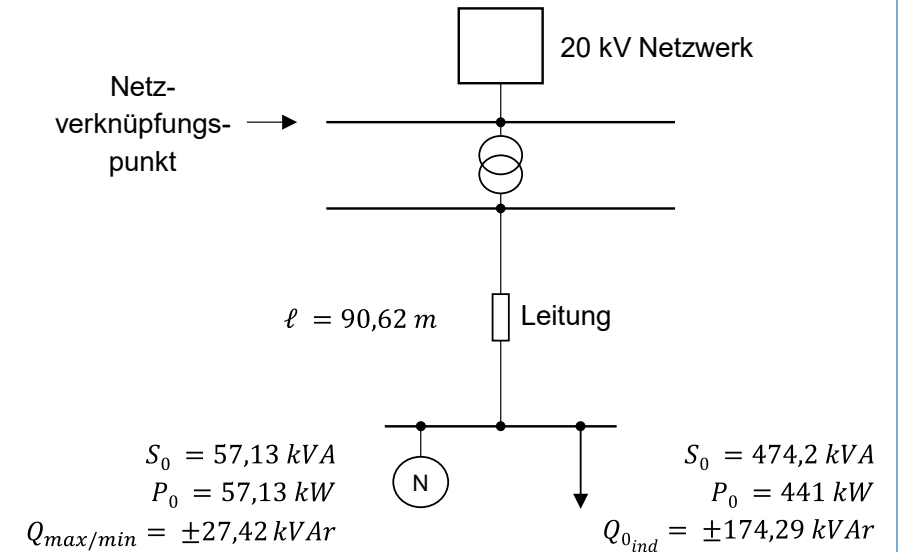


**Validierung anhand eines ländlichen Netzes unter Verwendung verschiedener NNFs und Berechnung der Modellierungsfehler**

### Alternatives Netz

- Städtisches Niederspannungsnetz („1-LV-urban6-0-sw“) aus der Simbench-Datenbank
  - Strahlennetz
  - Nennspannung 0,4 kV
  - 20 kV/0,4 kV Transformator (160 kVA)
  - 59 Knoten
  - 5 Netzeinspeisungen (ca. 57 kW)
  - 111 Lasten (441 kW)
- Netznutzungsfälle des Jahres 2016 im Viertelstundentakt
- Standard-Q(U)-Kennlinie aus VDE-AR-N 4105

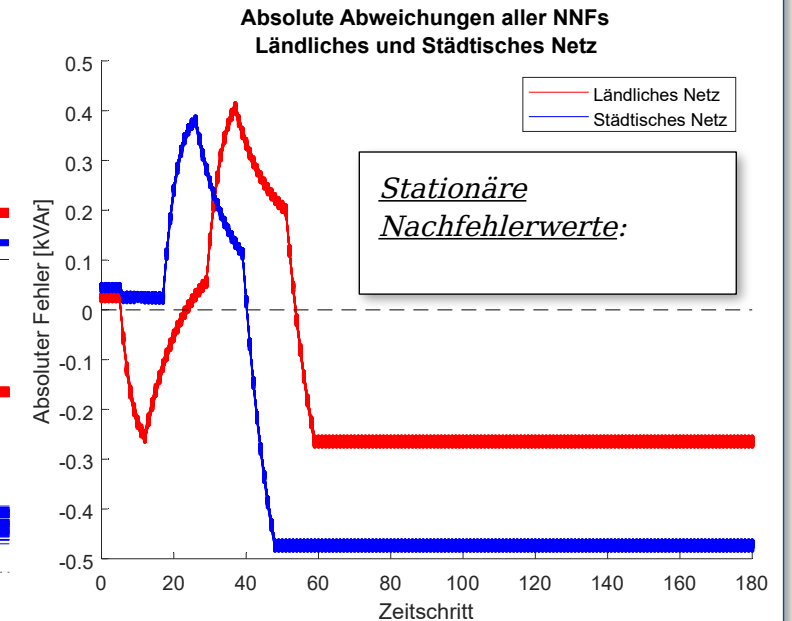
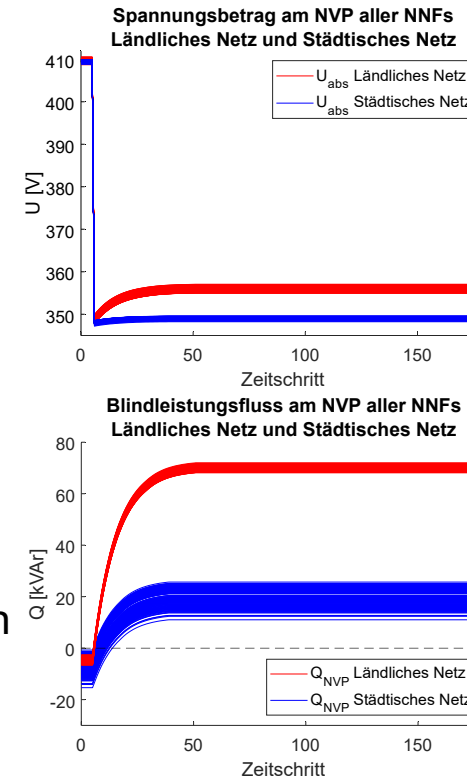
### Ersatzmodell des städtischen Netzes



Zur Überprüfung auch Validierung anhand eines städtischen Netzes

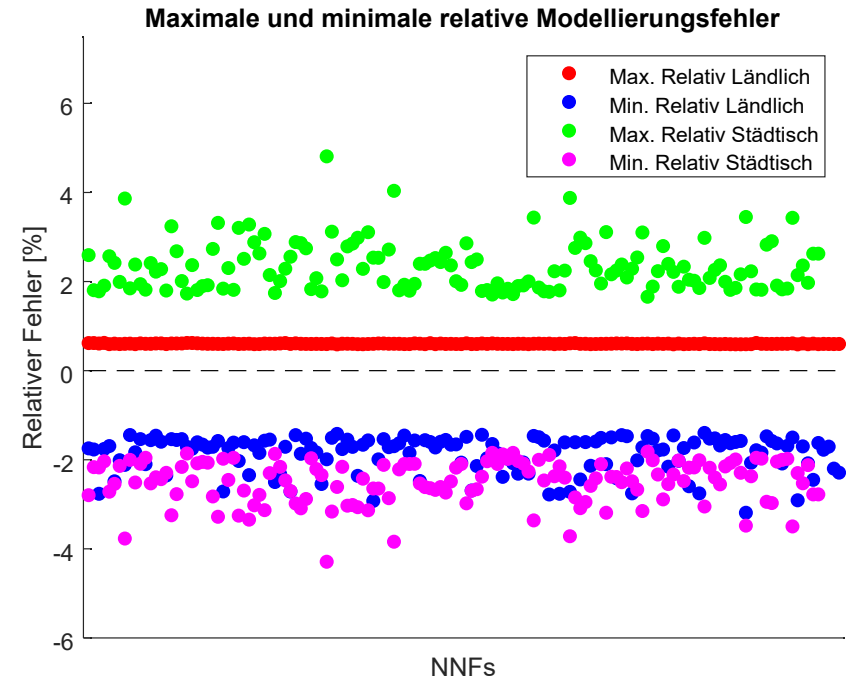
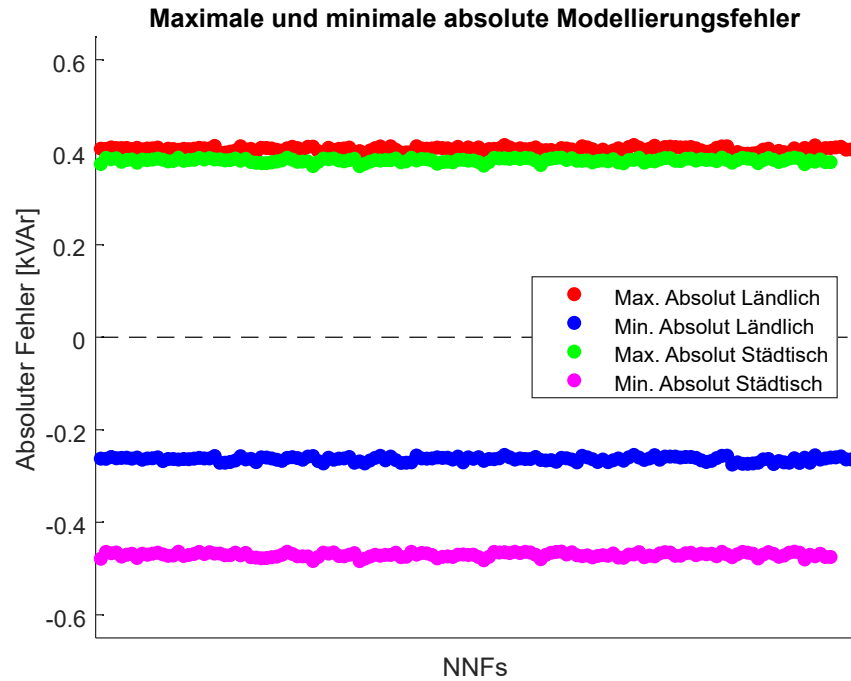
### Absoluter Modellierungsfehler

- Höhere Blindleistungsflüsse im ländlichen Netz; Spannung wird nach Spannungssprung aufgrund auftretender Wechselwirkungen stärker gestützt
- Spannungsstützung hat Rückwirkungen auf die  $Q(U)$ -Kennlinie
- Ein anderer Betriebspunkt und somit eine andere Blindleistungsbereitstellung stellen sich ein
  - Länger andauernder Einschwingvorgang im ländlichen Netz aufgrund stärkerer Wechselwirkungen
- Städtisches Netz ist abhängiger vom Verbrauchsverhalten und wird demnach deutlich variabler belastet
  - Größere Streuung der Blindleistungsflüsse



**Absolute Modellierungsfehler fallen mit maximal 0,4 kVAr und minimal -0,5 kVAr gering aus**

### Abschließende Validierung der Ersatznetzmodellierung



**Hergeleitete Ersatznetzmodellierung erweist sich als geeignet für die Abbildung des Einspeiseverhaltens in Niederspannungsnetzen**

# Zusammenfassung und Ausblick

## Zusammenfassung

- Zunahme an DEA und neuartigen Verbrauchern in MS und NS-Netzen → Dynamische Blindleistungsregelungen, Wechselwirkungen zwischen MS- und NS-Netzen
- Zur Planung von Mittelspannungsnetzen ist detaillierte Abbildung spannungsregelnder Anlagen erforderlich
- In diesem Zusammenhang auch Modell unterlagerter NS-Netze notwendig
- Modellierung von NS-Netzen durch aggregierten Ersatzgenerator und Ersatzlast sowie äquivalenter Reaktanz → Übertragung bereits erfolgter Arbeiten im Übertragungsnetz auf die Abbildung von NS-Netzen
- Validierung der Ersatznetzmodellierung anhand der Simulation eines ländlichen und städtischen Netzes mit verschiedenen NNFs
- Ersatznetzmodellierung erweist sich aufgrund gering ausfallender Modellierungsfehler als geeignet zur Abbildung des Einspeiseverhaltens in Niederspannungsnetzen

## Ausblick

- Effekt der Modelle im Vergleich mit statischen Modellen (aggregierte konstante Last/Erzeugung) in dynamischen Simulationen ermitteln