

# Power Quality State Estimation in Verteilnetzen auf Basis Neuronaler Netze

Patrick Mack, Markus de Koster, Patrick Lehnen, Eberhard Waffenschmidt, Ingo Stadler

Institut für Elektrische Energietechnik  
Cologne Institute for Renewable Energy  
Technische Hochschule Köln  
www.th-koeln.de

Kontakt:  
patrick.mack@th-koeln.de  
Betzdorfer Straße 2, 50679 Köln  
29.11.2023

## Motivation

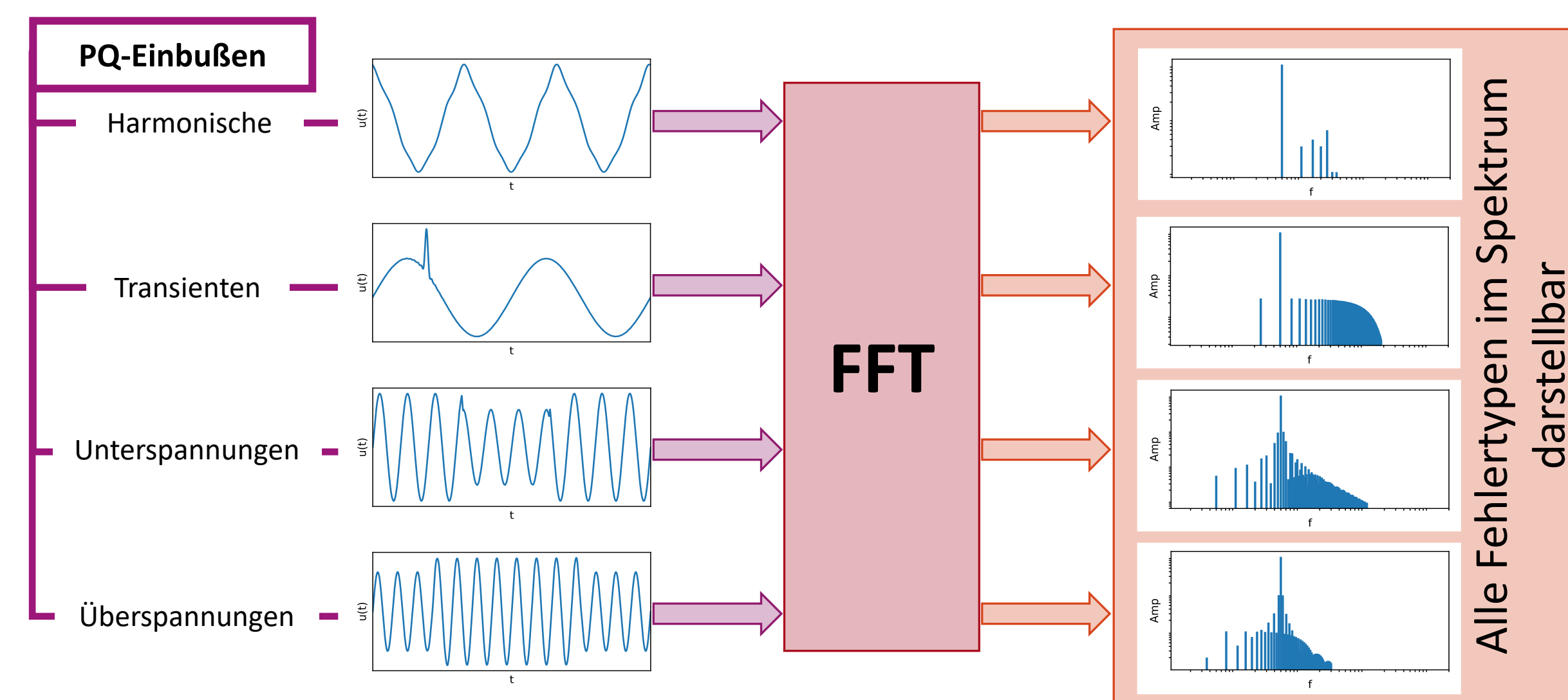
Mit Zunahme nicht-linearer Großverbraucher und -erzeuger wie...

- ...Photovoltaik
- ...E-Mobility
- ...Wärmepumpen

wird das Monitoring von Spannungsqualität (PQ) immer wichtiger.

**Kostspielige PQ-Messungen können durch Zustandsschätzung (SE) ersetzt werden!**

## PQ-Fehler-Transformation/-Aufbereitung



### Vorteile der Transformation

- Sämtliche Fehlertypen können auf signifikante Anteile reduziert werden.
- Minimales Datenaufkommen (Edge-Computing Ansatz).
- Beobachtbarkeit von Transienten komplex berechenbar.

Bild 1: Fehlertypen im Zeit- und Bildbereich

## Prozess der PQ-Zustandsschätzung mit Deep Learning

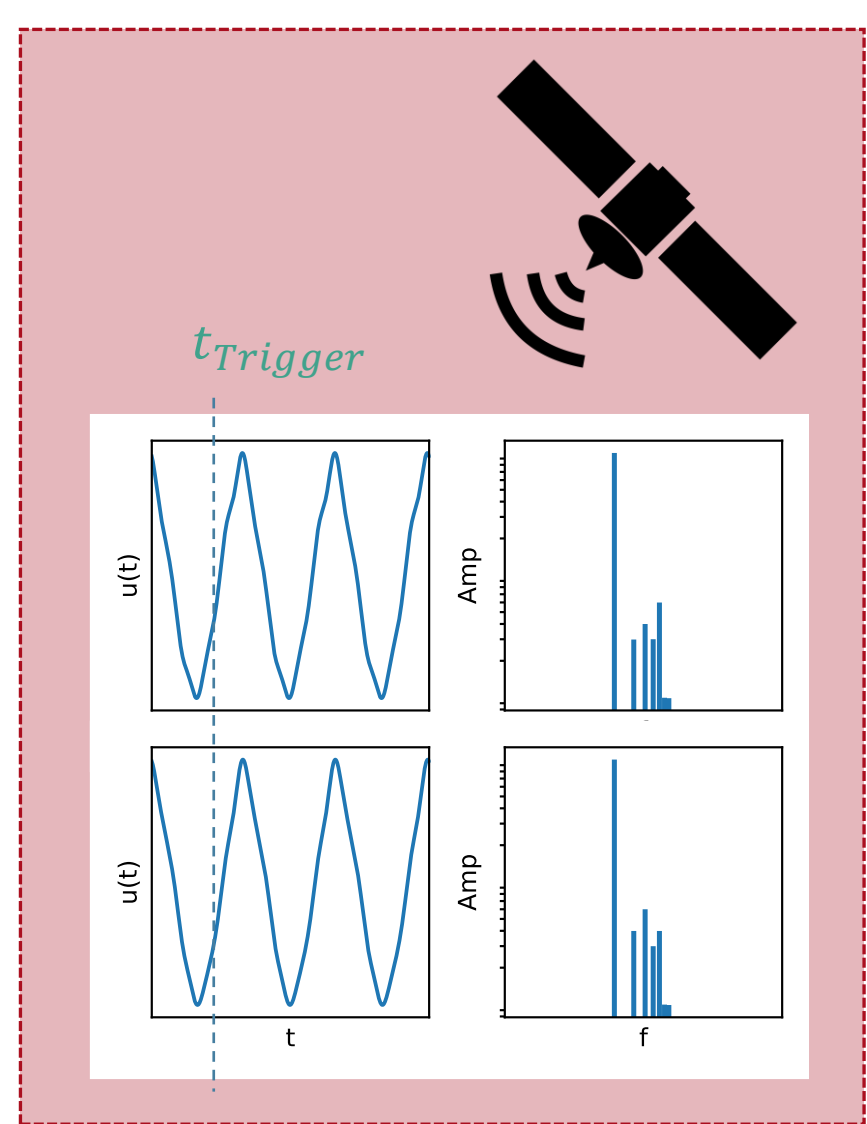


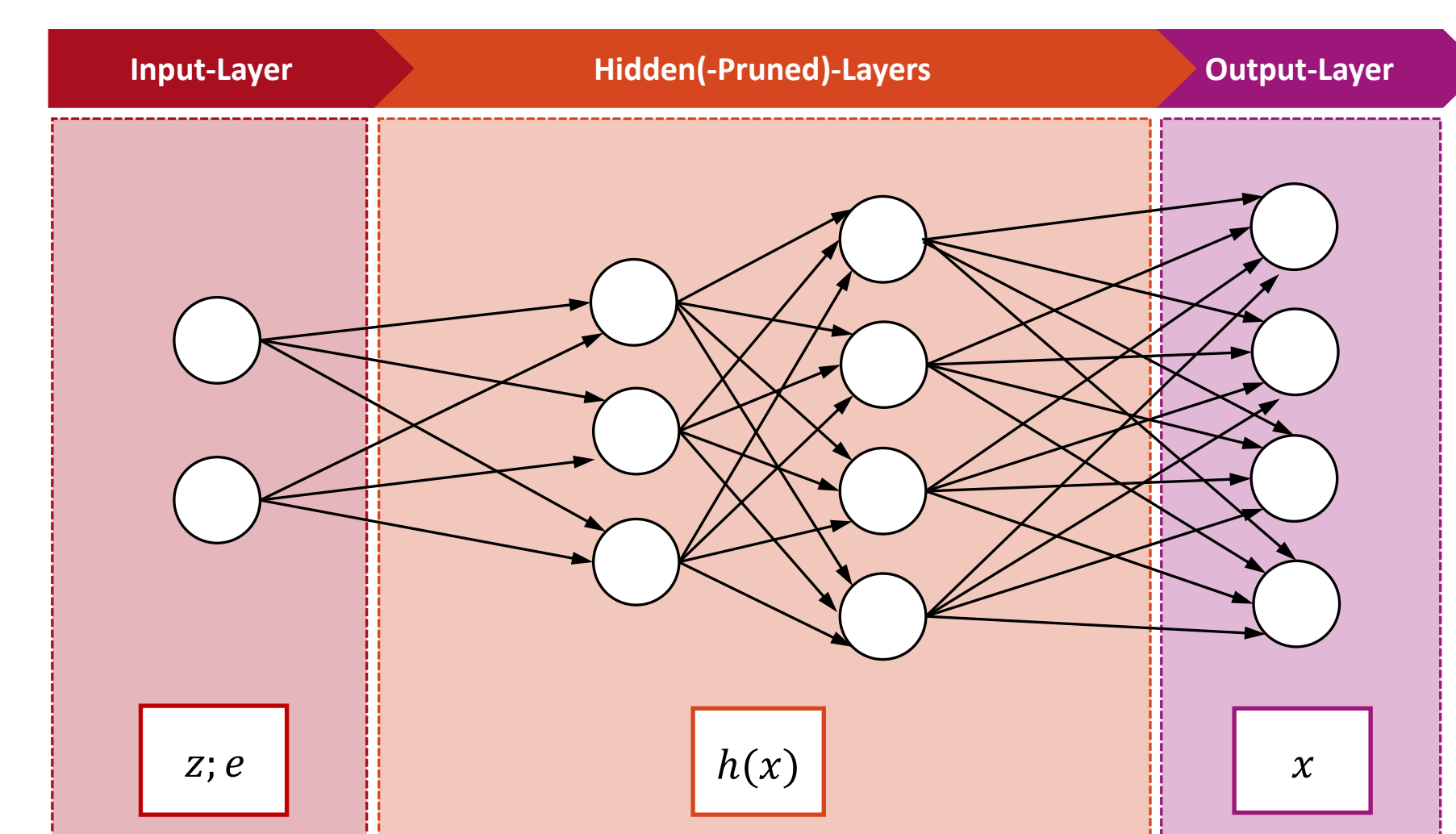
Bild 2: Systemischer Gesamtüberblick

Isolation und Reduktion

$U_1^h \dots U_k^h$

### Physics-Aware Neural Network (PANN)

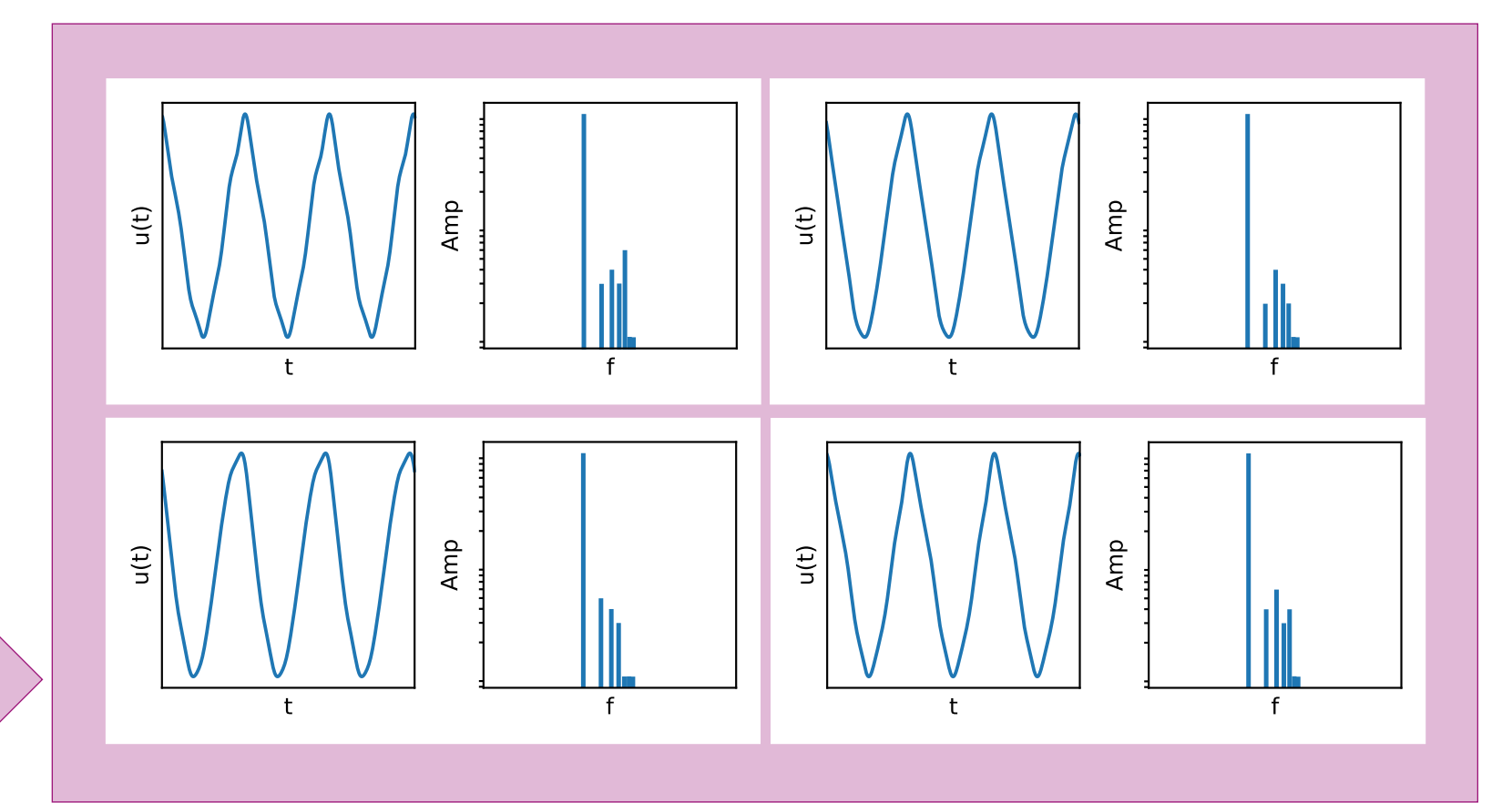
- Berücksichtigt el. Netzstruktur in Architektur
- Beinhaltet Admittanzmatrix-Layer



$$\text{Allg. Modellierungsgleichung: } z = h(x) + e$$

$z$ : Messwerte,  $x$ : Unbekannte Zustände,  $h(x)$ : Schätzfunktion von  $x$ ,  $e$ : Messfehler

$n = k$ : Anzahl geschätzter Knoten  
 $h$ : Harmonische Ordnung  
 $U_{k+1}^h \dots U_n^h$



### Output und Post-Processing

- Für alle Knoten wird das Spektrum erstellt
- Über FFT-Synthese können Zeitsignale hergestellt werden
- Weitere PQ-Parameter (z.B. Flickerlevel, THD, Symmetrie) können berechnet werden

## Testnetz (CIGRE)

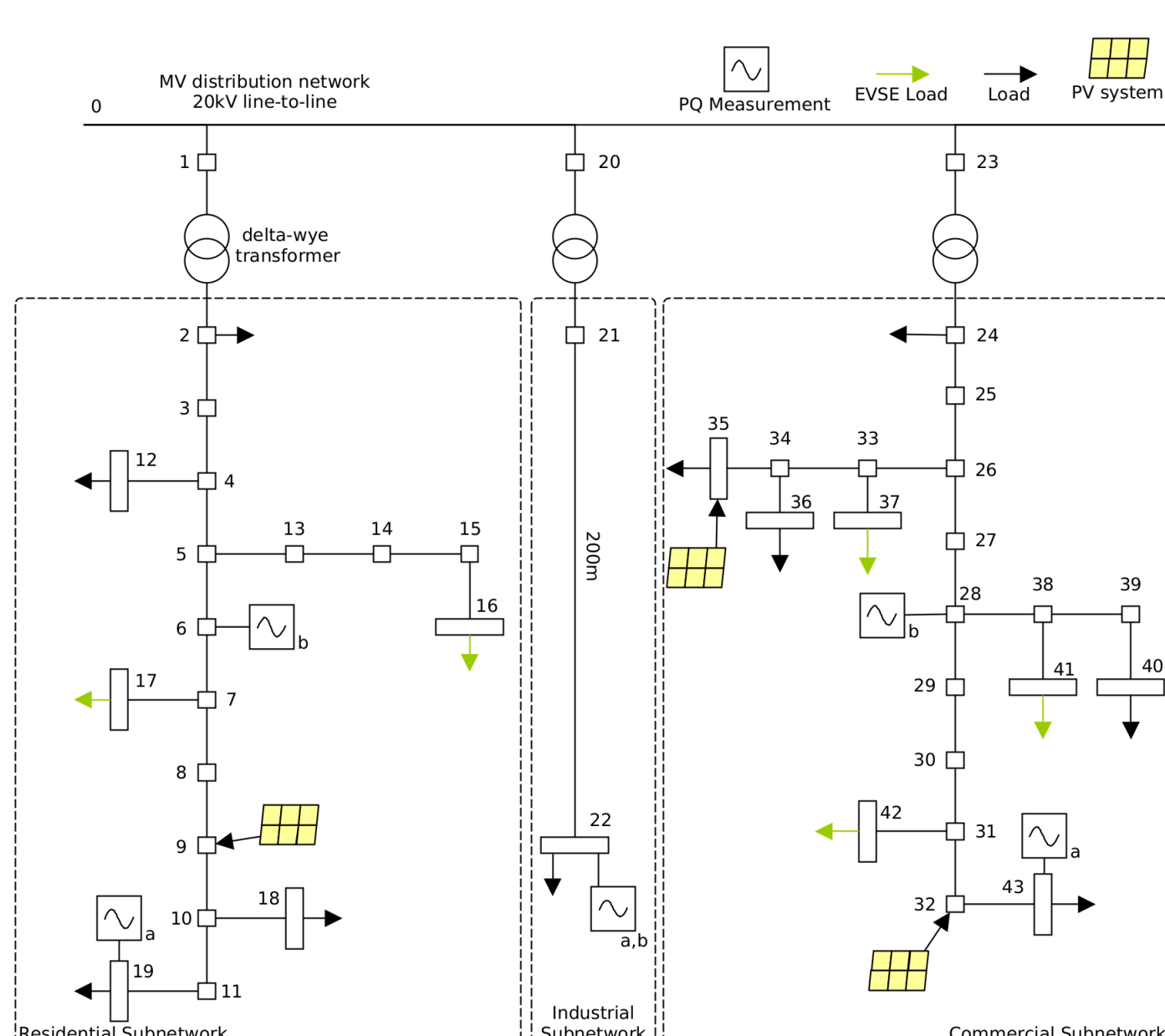


Bild 3: Testnetz für Training und Validierung

- Heterogenes Verteilnetz (NS/MS) gewählt
- PV, Emob & Lineare Lasten berücksichtigt
- 3 Messgeräte platziert (Varianten a, b)

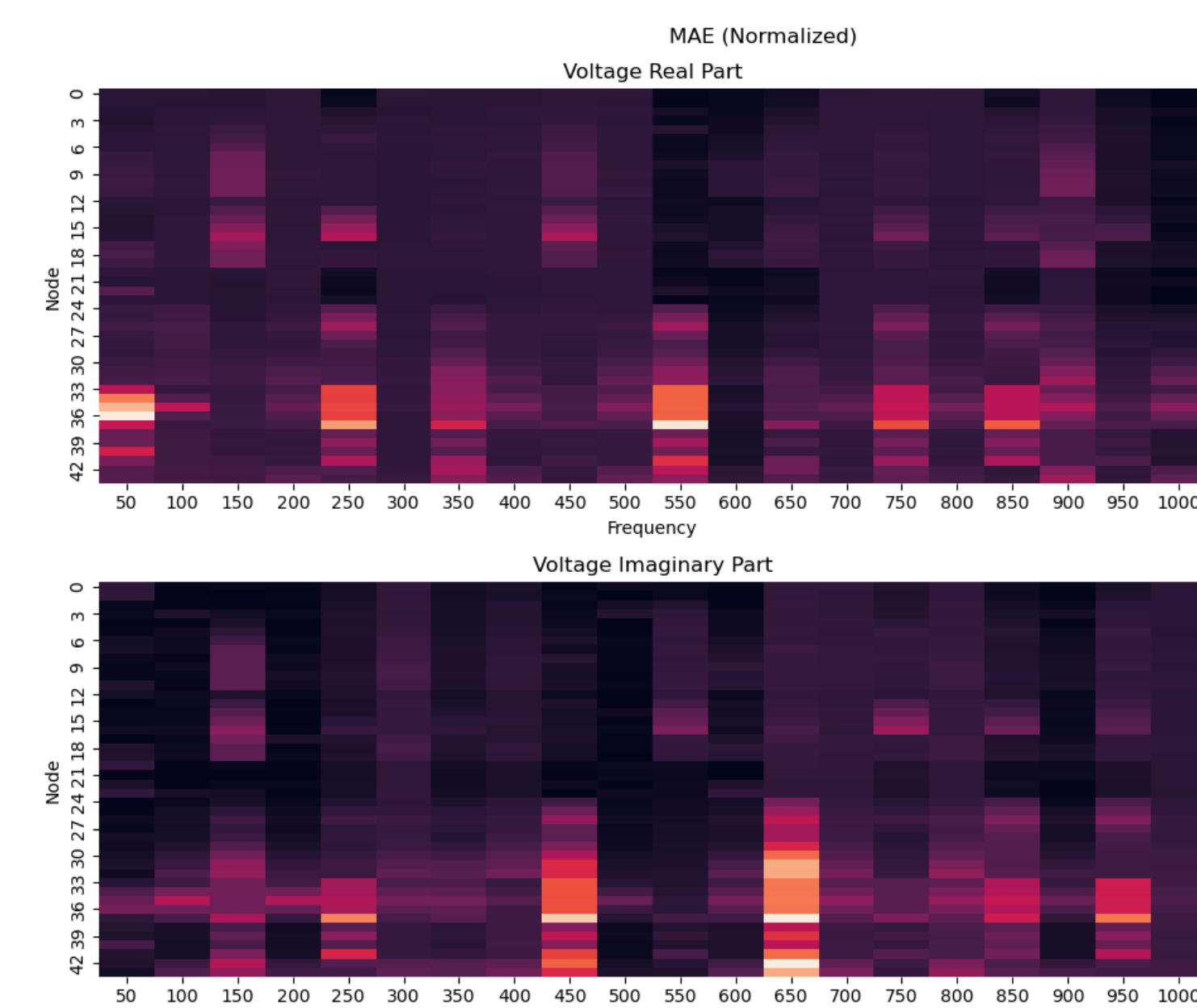


Bild 4: Overall-MAE (normalisiert) für Validation Loss PANN

	DNN	PANN
Validation Loss MSE (3000 Epochs)	$1,1 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-6}$

- Harmonic-SE mit 20 Harmonischen durchgeführt (1-Jahres-Simulations-Daten für Training & Validierung)
- Sehr geringer Mean Squared Error (MSE) im Validation Loss erreicht (s. Tab.)
- PANN performt besser als Dense NN (DNN)

## Ergebnisse

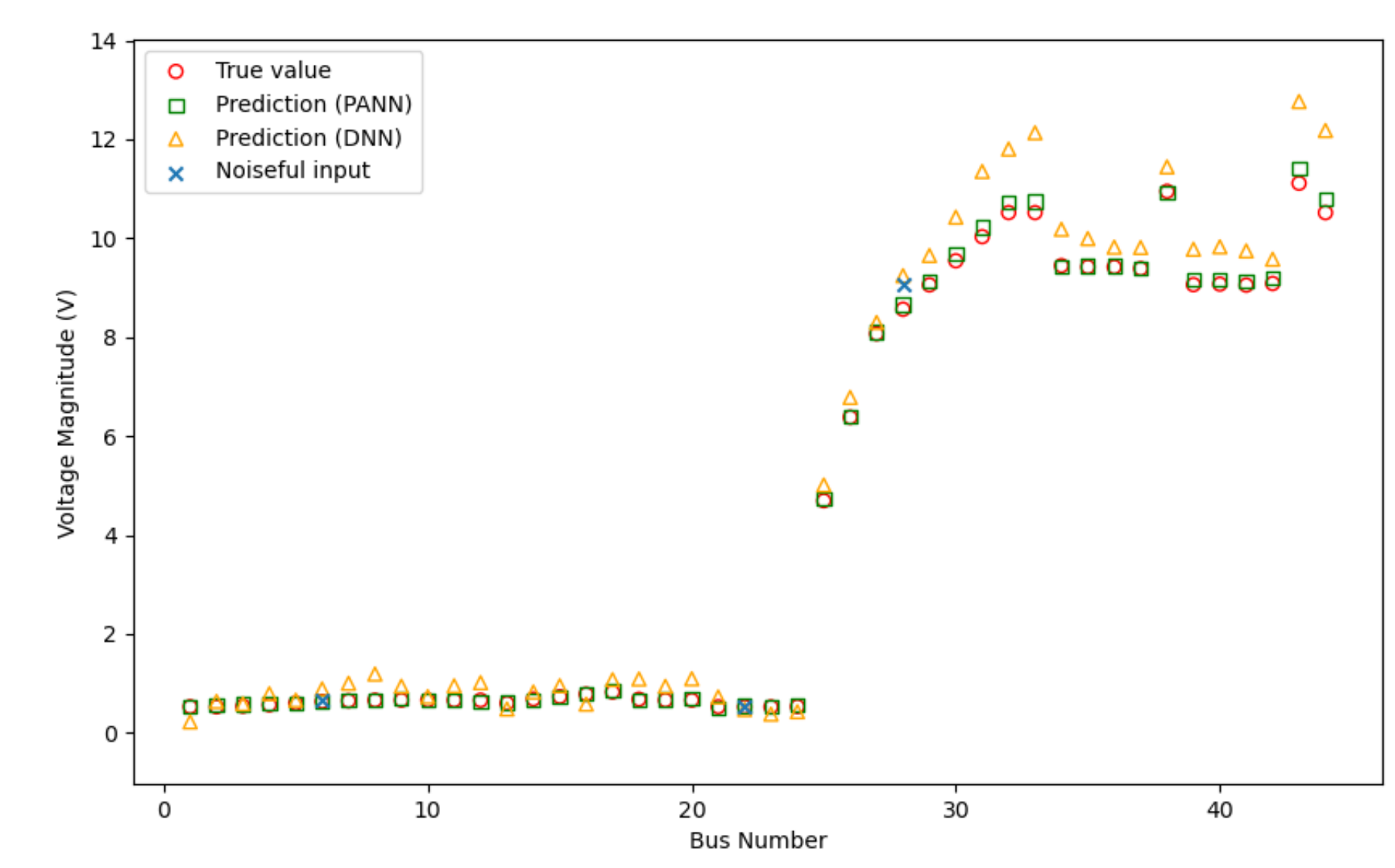


Bild 5: Beispielhafte Zustandsschätzung 13. Harmonische

## Zusammenfassung

- Flexible PQ-Zustandsschätzung entwickelt
- Kann theor. Ausbreitung aller Fehlertypen schätzen
- Berechnungszeit für 44x20 Harmonische <1s
- Sehr geringe Messgerätedichte möglich (3 vs 44)

## ToDo's

- Flexibler Frequenzinput des PANN
- Erprobung anderer Fehlertypen