

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Andreas Winter, Selina Prinz, Johannes Diegler, Michael Igel, Peter Schegner

Monitoring in Niederspannungsnetzen mit Verfahren der künstlichen Intelligenz

Validierung der Methodik in einem realen Stromnetz

17. Symposium Energieinnovation, 16.-18.02.2022, Graz/Austria



htw saar





Inhalt

- Motivation
- Grundlagen künstlich neuronaler Netze (KNN)
- Methodik und Vorgehensweise
- Simulation und Ergebnisse
- Zusammenfassung und Ausblick

Motivation

Ziele für den Klimaschutz in Europa

- 55 % Treibhausgaseinsparung bis 2030
- Klimaneutral bis 2050

Vorschläge zur Umsetzung

- Ausweitung des Emissionshandels auf Verkehr und Gebäude
- CO₂-Grenzwerte für PKW
- Ausbau der Ladeinfrastruktur
- Ausbau Erneuerbare Energien
- ...

Auswirkungen auf den Netzbetreiber

- Zunehmend dezentrale Energieversorgung
- Veränderungen der Last- und Einspeisesituation in der Niederspannungsebene durch:

Elektro-Ladesäulen

Photovoltaik

Speicher

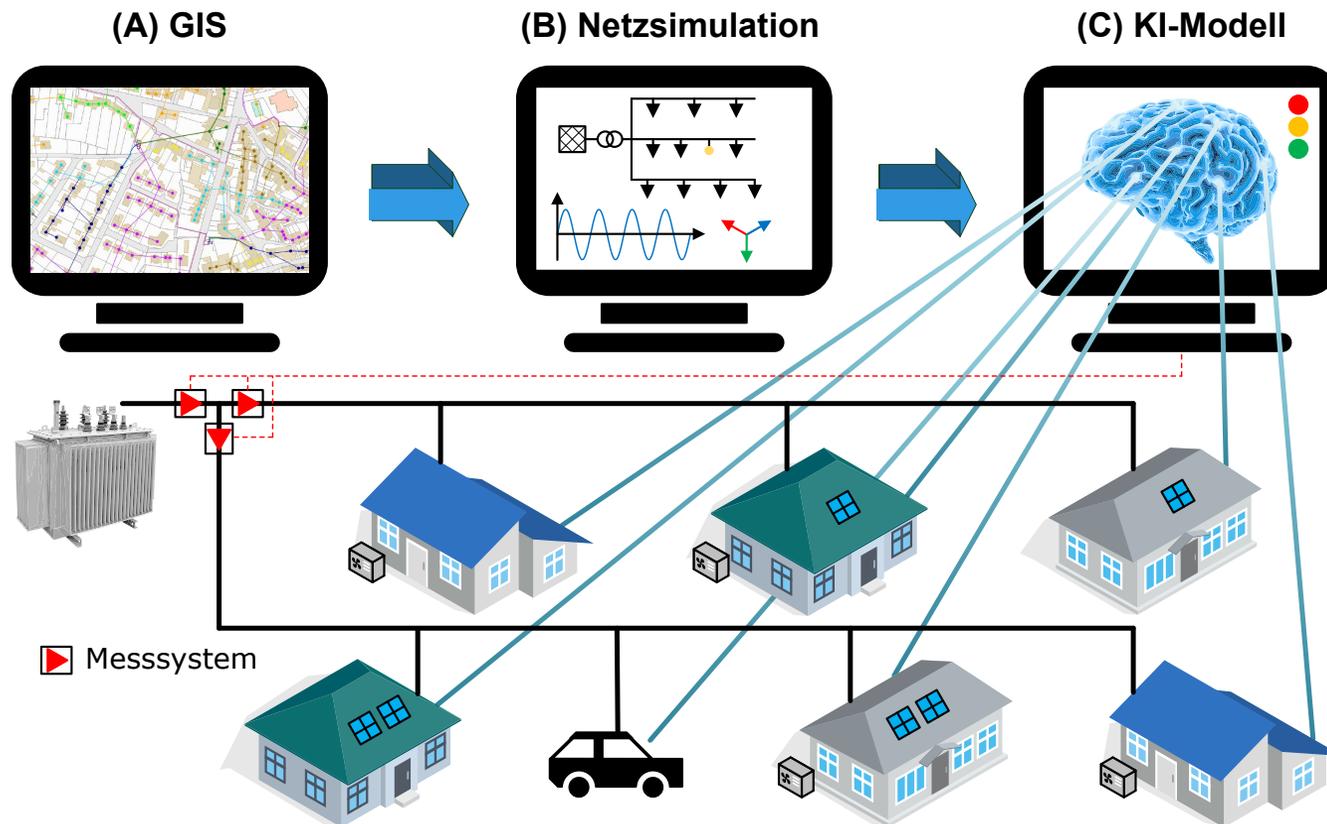
Wärmepumpen

...

Maßnahmen des Netzbetreibers

- Verstärkte **Netzplanungsmaßnahmen** durch z.B. anlagenspezifische Prognoseprofile
- Netzbetrieb in der Niederspannungsebene
→ innovative Lösungen zur **Netzzustandsschätzung**

Gesamtsystem



(A) GIS

- Automatisierter Aufbau der Netztopologie in der Netzsimulation
- Automatisierter Import von Betriebsmittel- und Topologiedaten

(B) Netzsimulation

- Berechnung relevanter Lastflussszenarien
- Speicherung der Ergebnisse in einer Datenbank

(C) KI-Modell

- KI-basierte Netzzustandsschätzung (KI-SE)
- KI-basierte Lastflussberechnung (KI-LF)

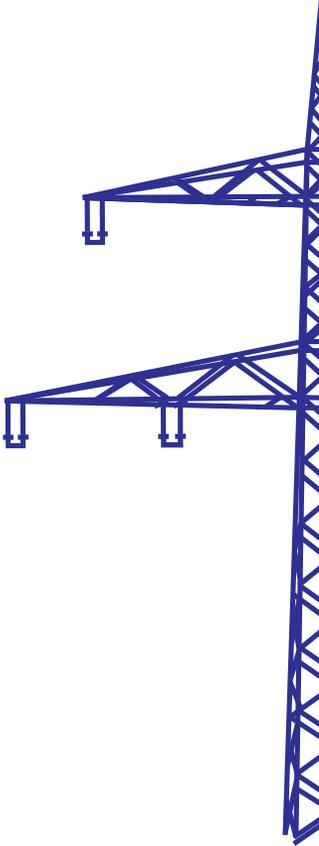
Gefördert durch:



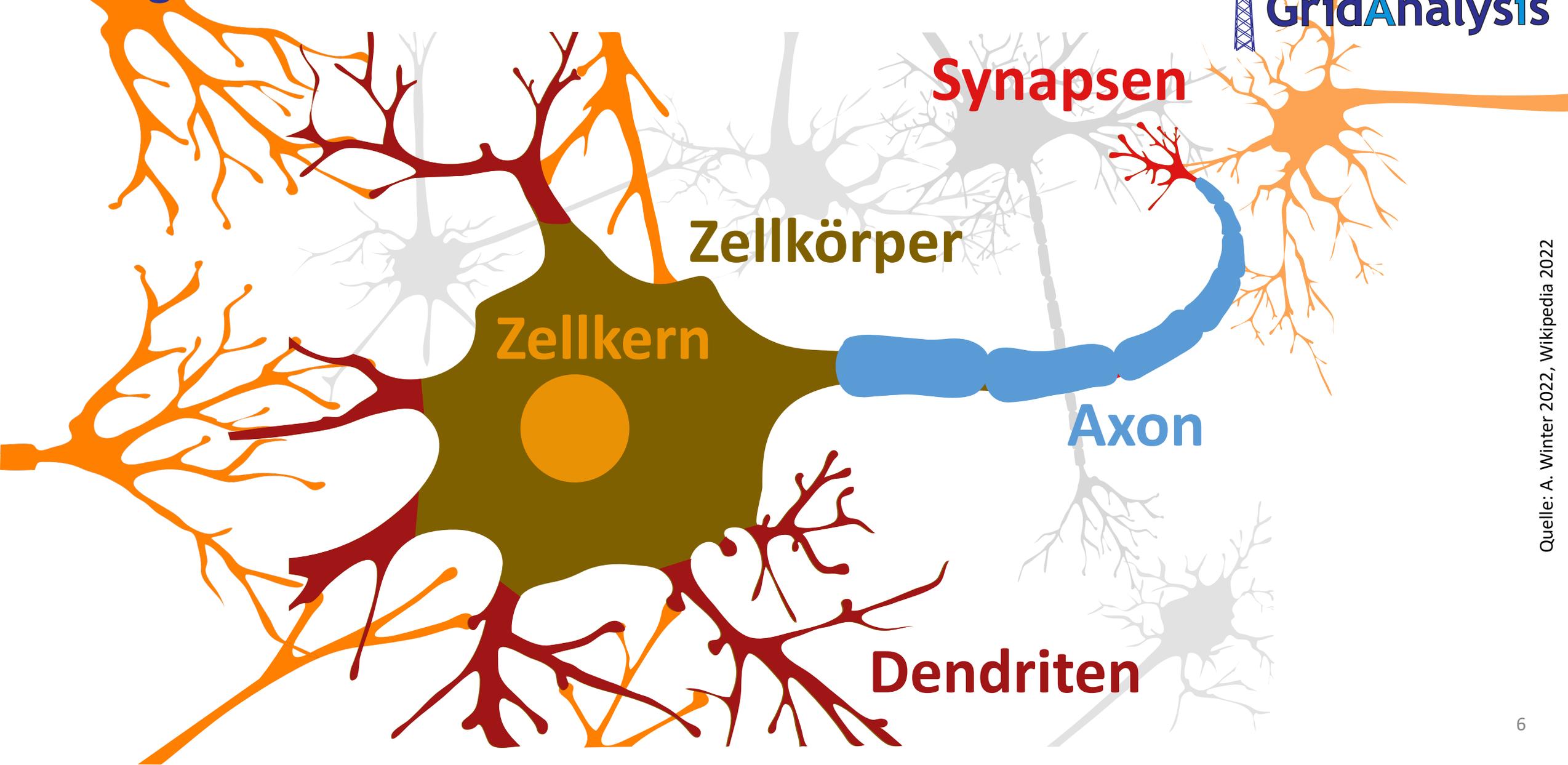
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Grundlagen Künstlich neuronaler Netze (KNN)



Biologisches Vorbild – Nervenzelle



Synapsen

Zellkörper

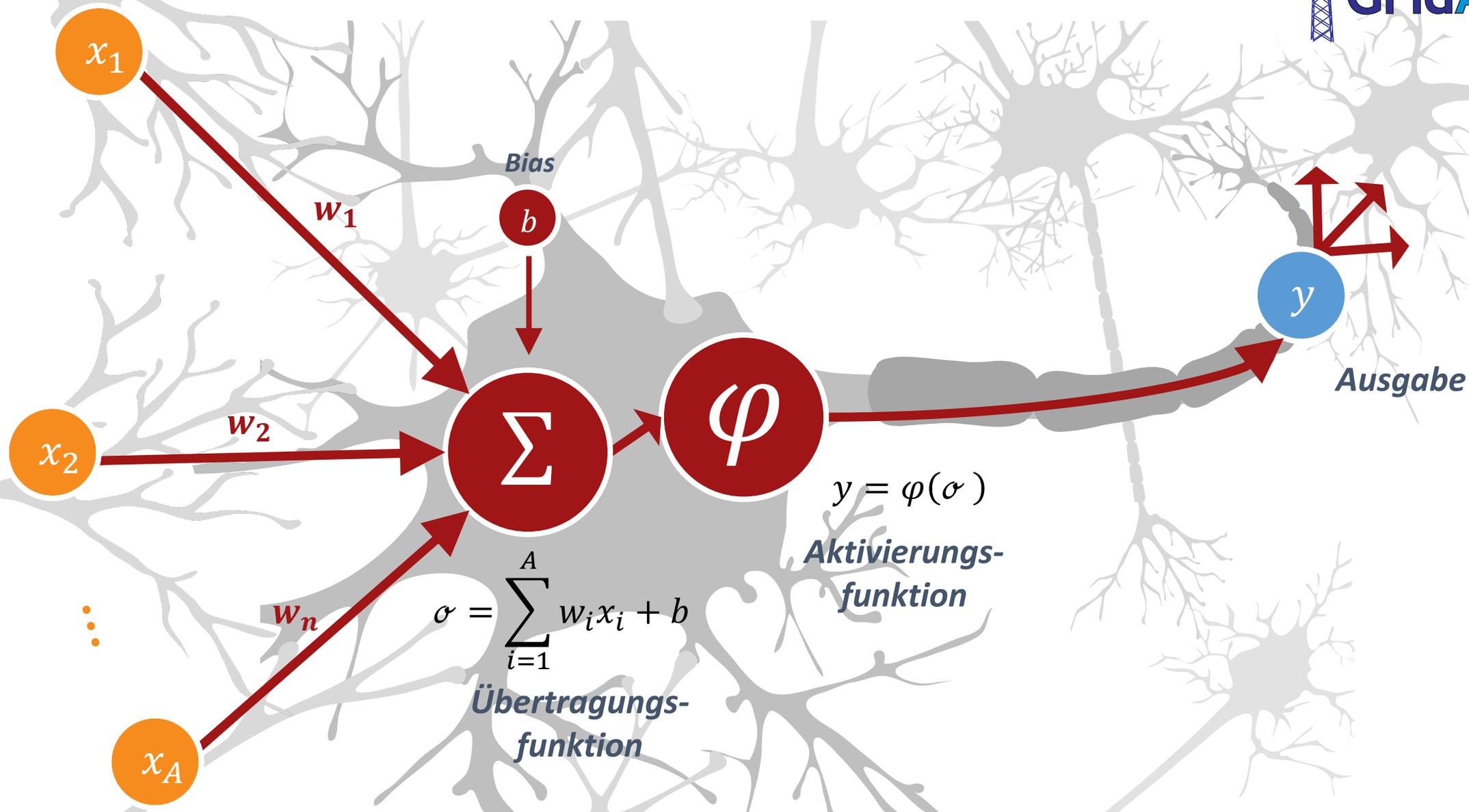
Zellkern

Axon

Dendriten

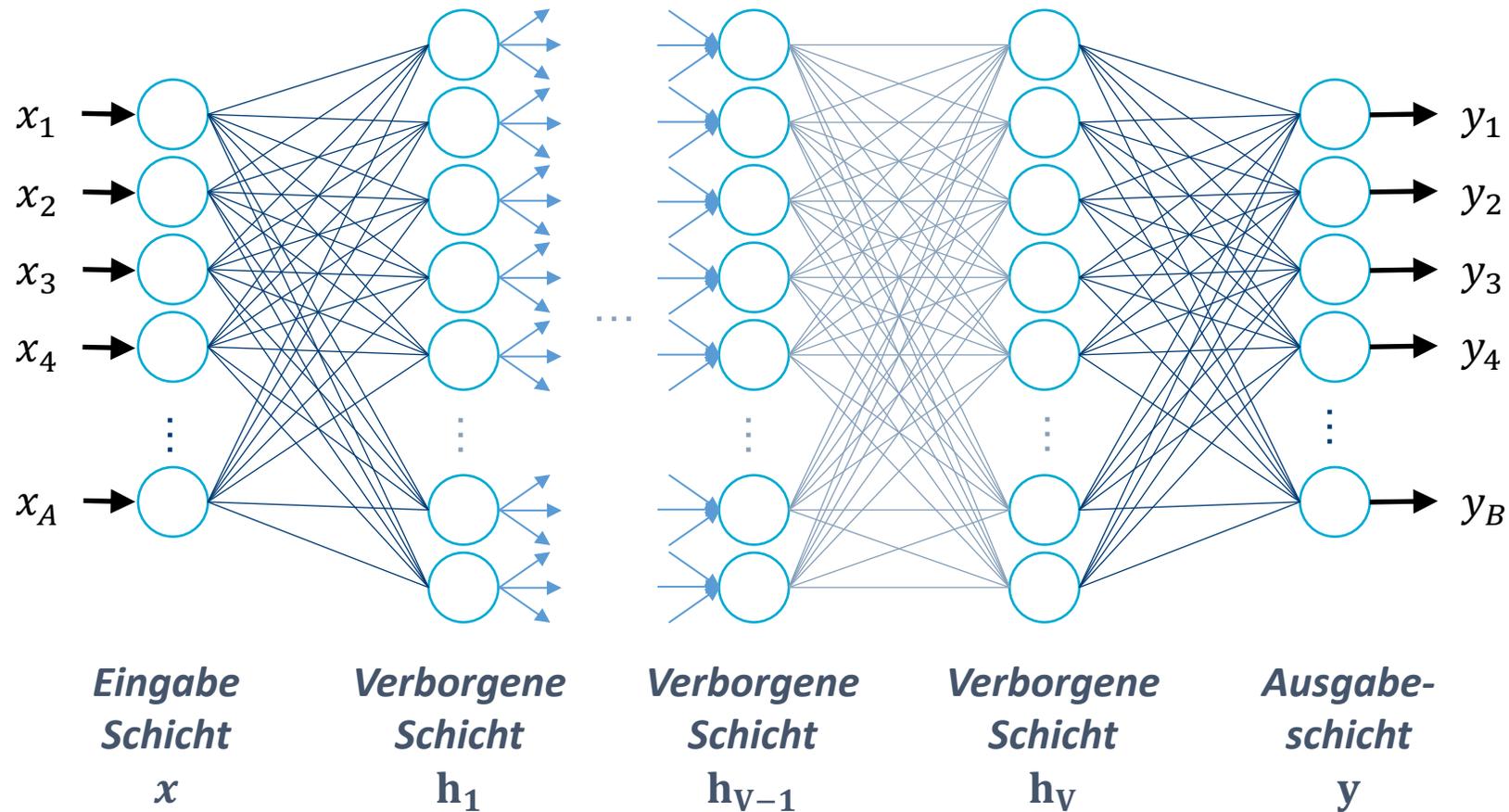


Biologisches Vorbild – Nervenzelle (Neuron)



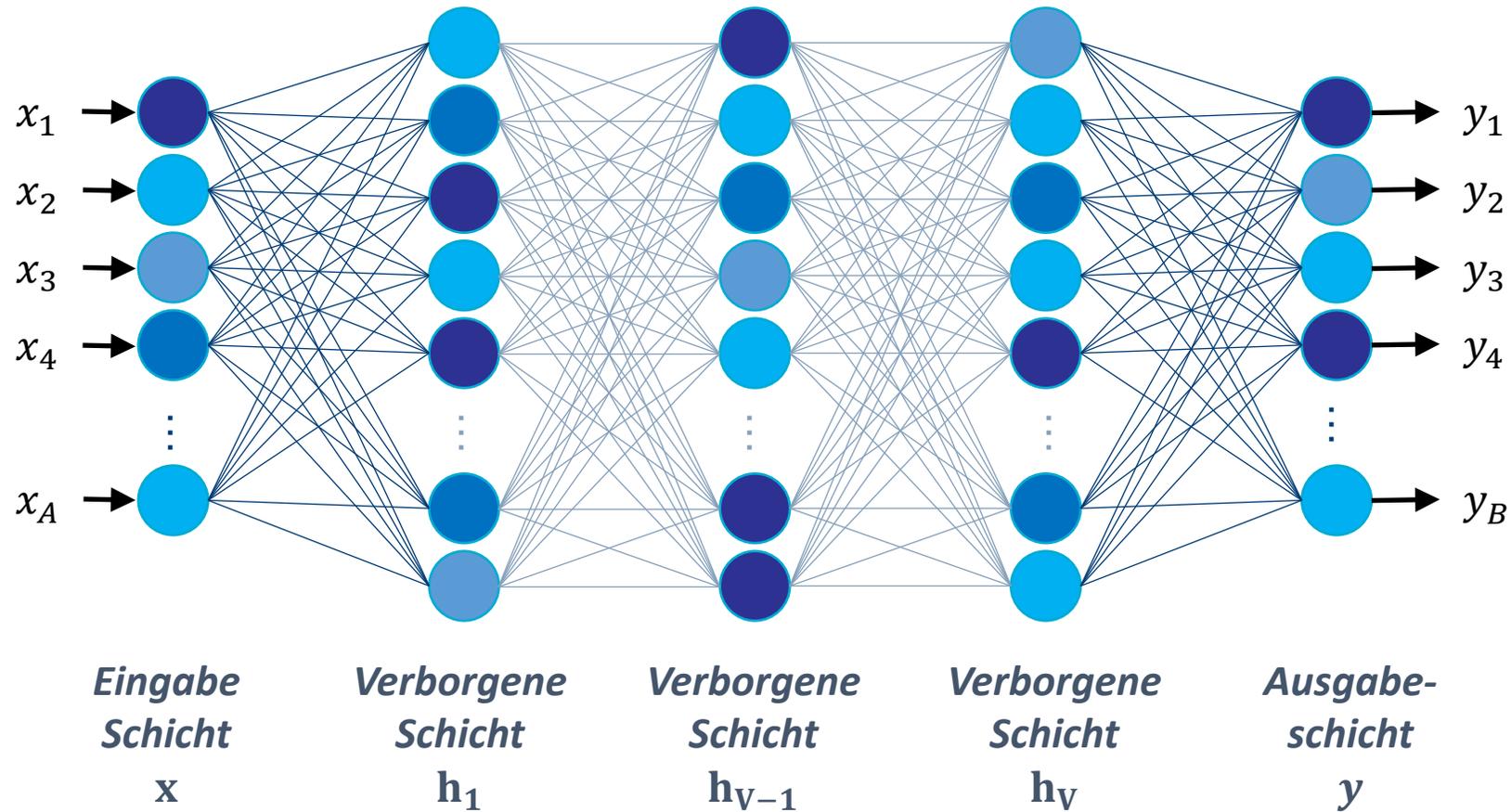


Neuronales Netz - Berechnung





Neuronales Netz - Berechnung



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

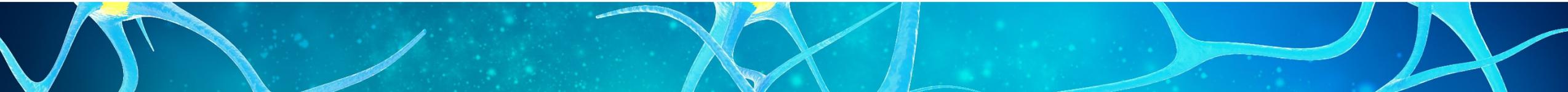
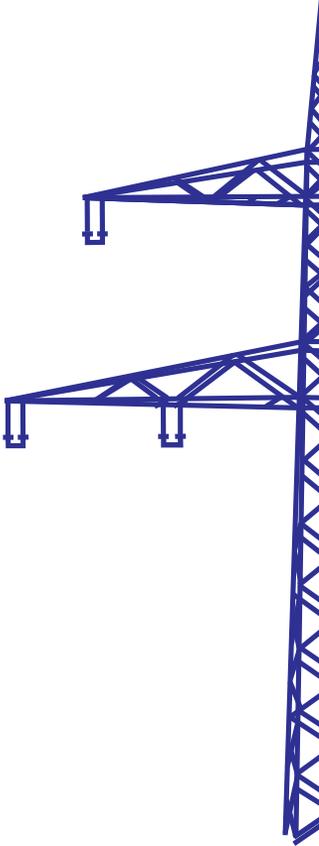


aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



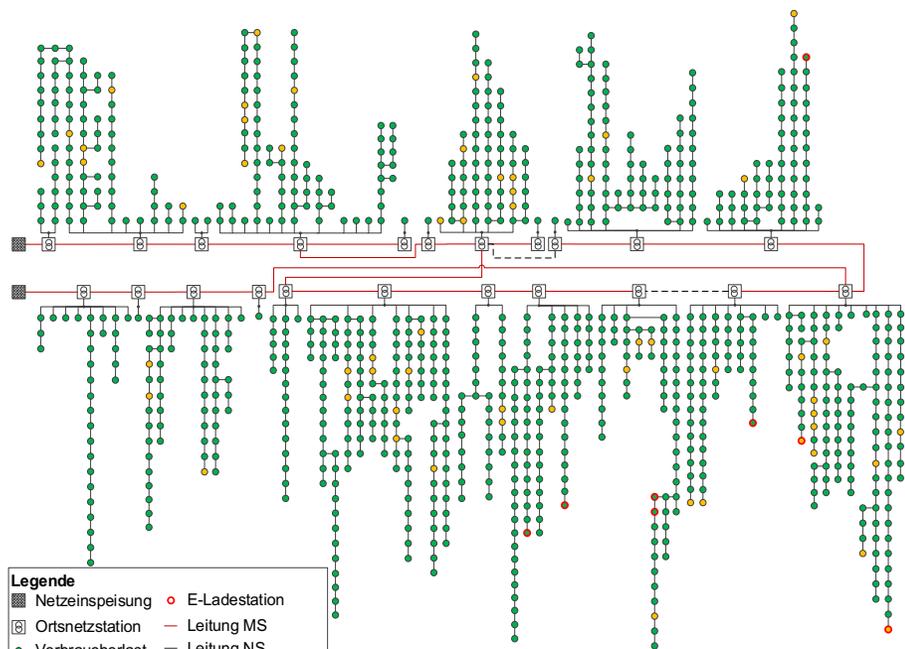
Methodik und Vorgehensweise

KI-basierte Lastflussrechnung und Netzzustandsschätzung

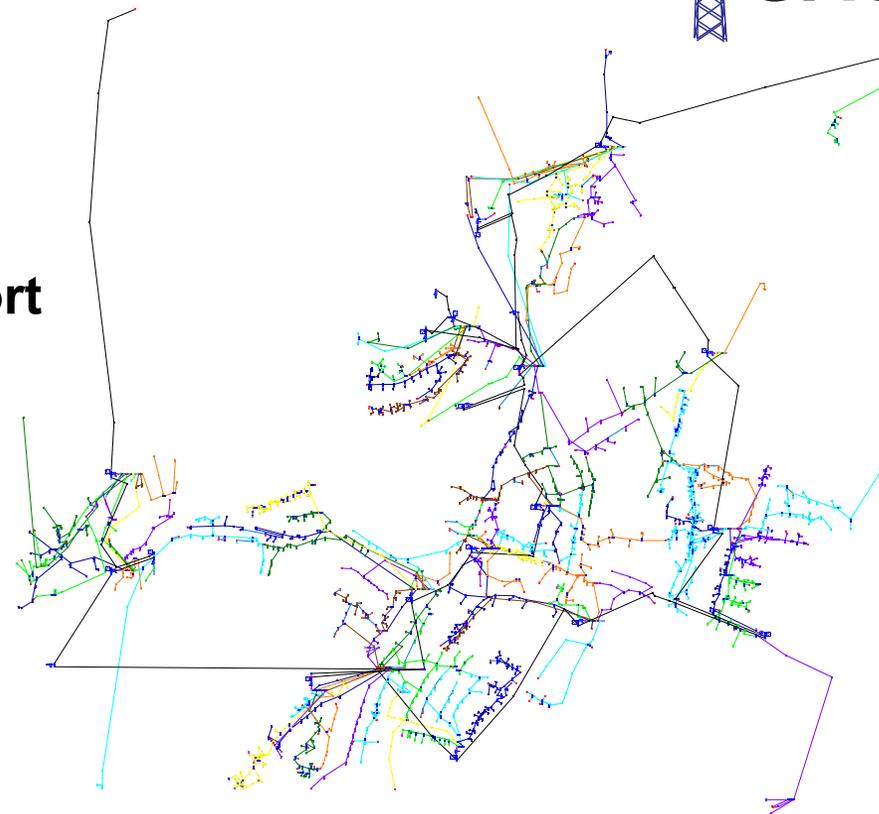
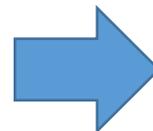




Untersuchtes Niederspannungsnetz



GIS-Import



71 km Leitung

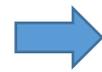
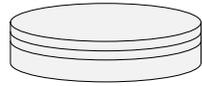
1087 Verbraucherlasten

63 PV-Anlagen

Methodik

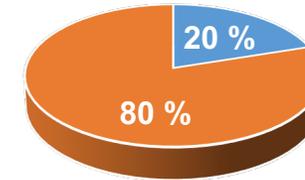


Daten



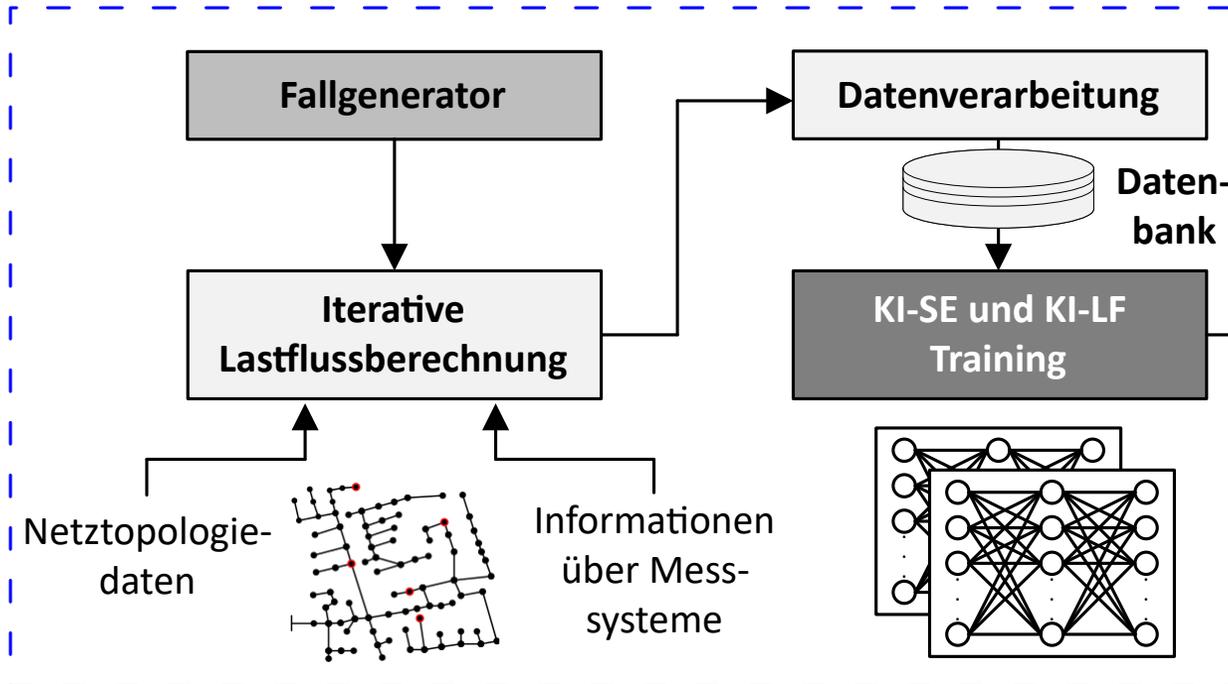
KI-LF: 50513

KI-SE: 131328

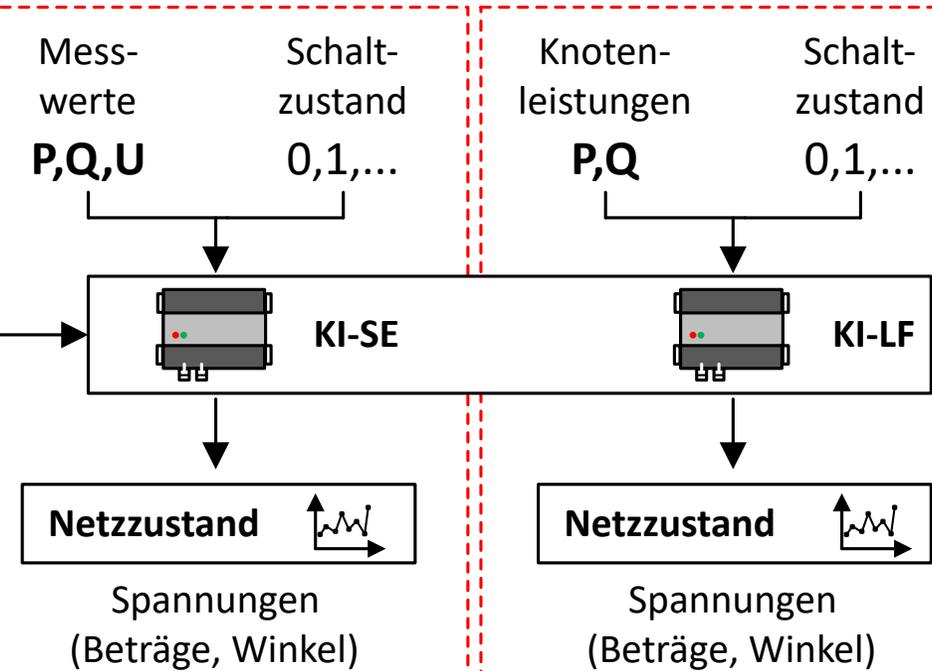


■ Test
■ Training

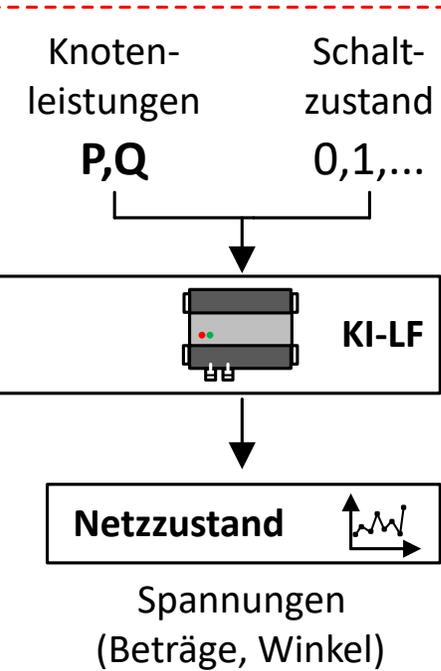
(a) Vorbereitungsphase (offline)



(b) KI-SE (online)



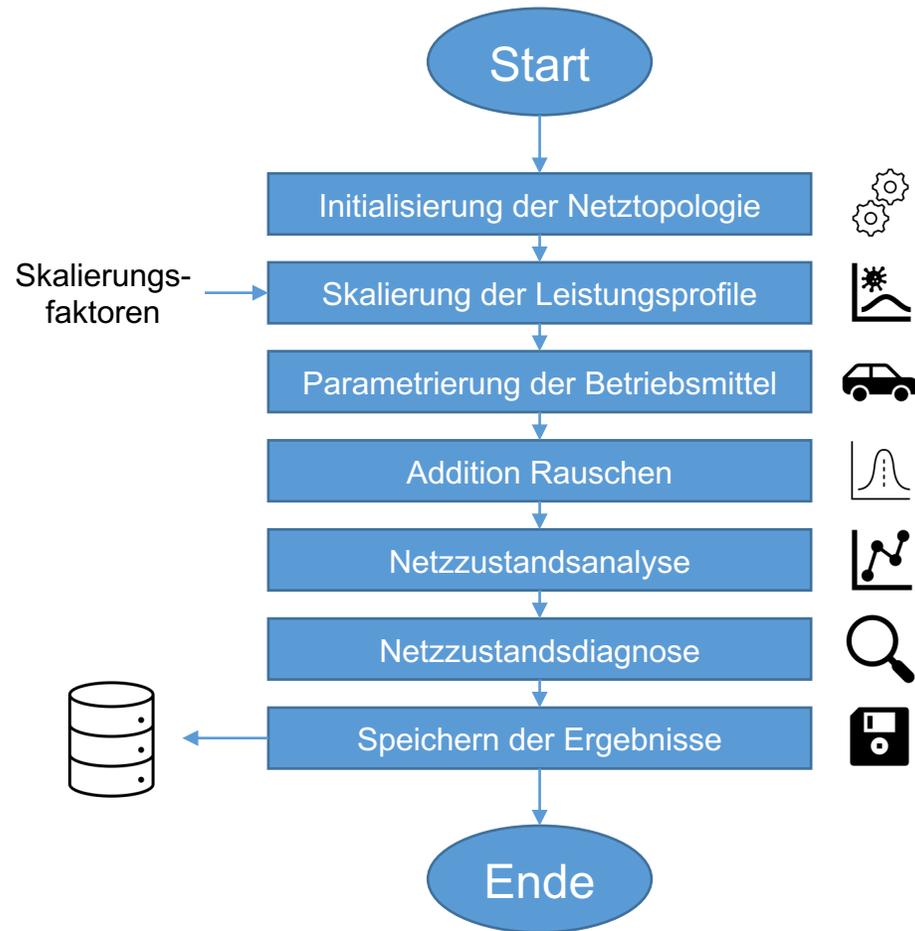
(c) KI-LF (online)



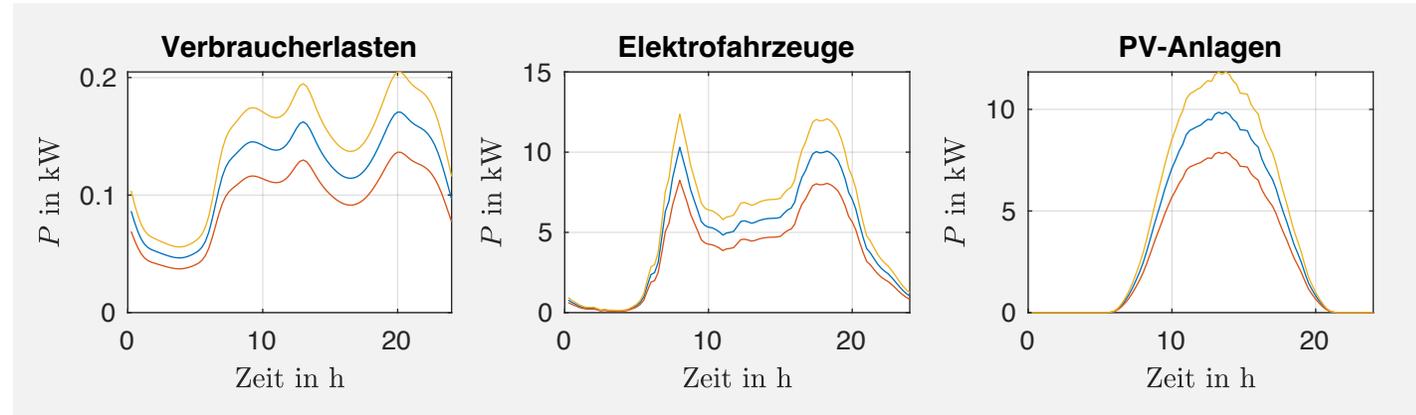
Quelle: A. Winter 2021: 2, Winter 2020: 129



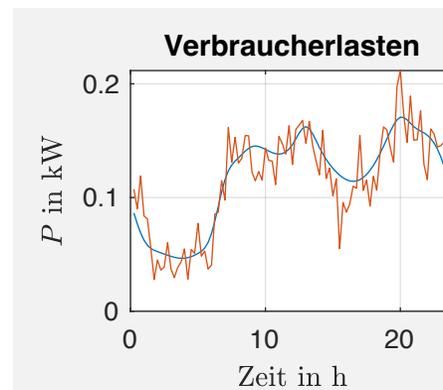
Fallgenerator



Skalierung der Leistungsprofile



Addition Rauschen

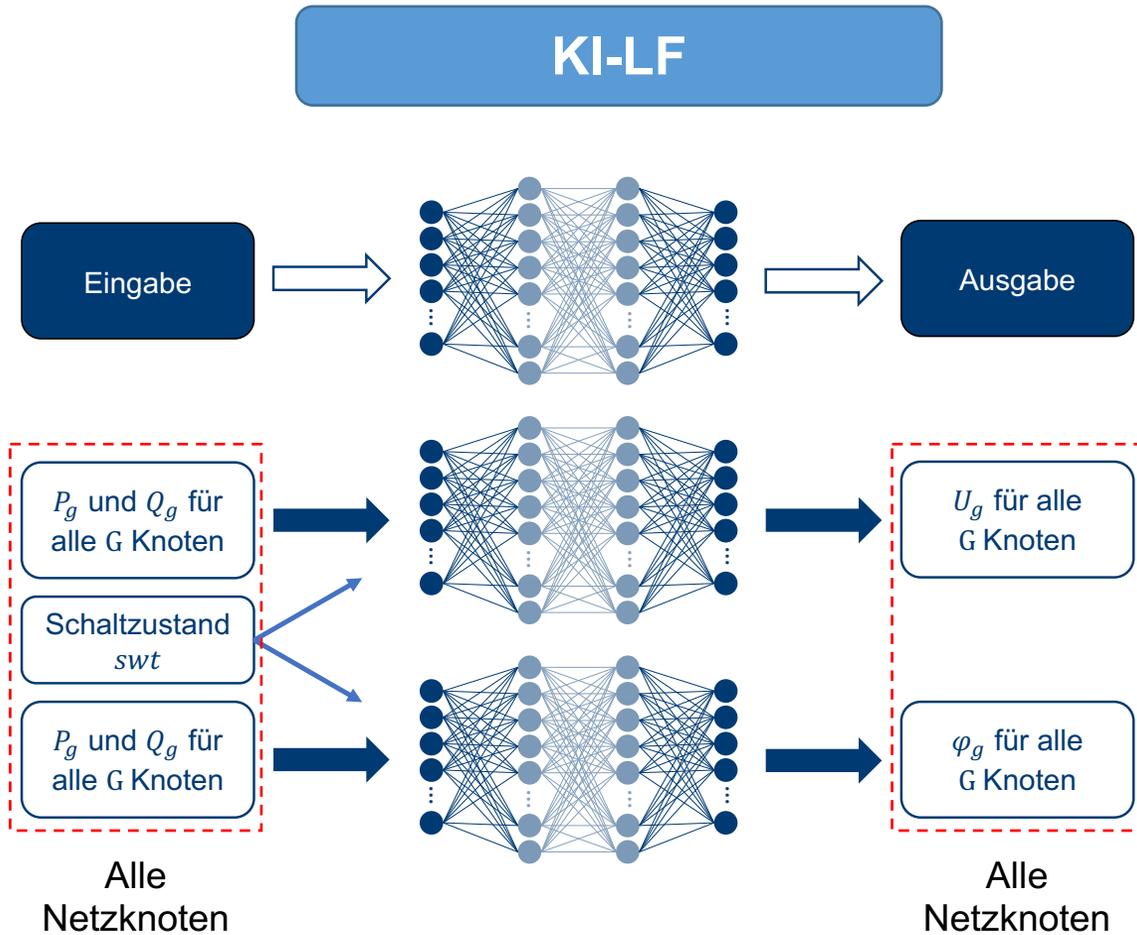


Rauschen zur Berücksichtigung der Variabilität zwischen den Anlagen des gleichen Typs

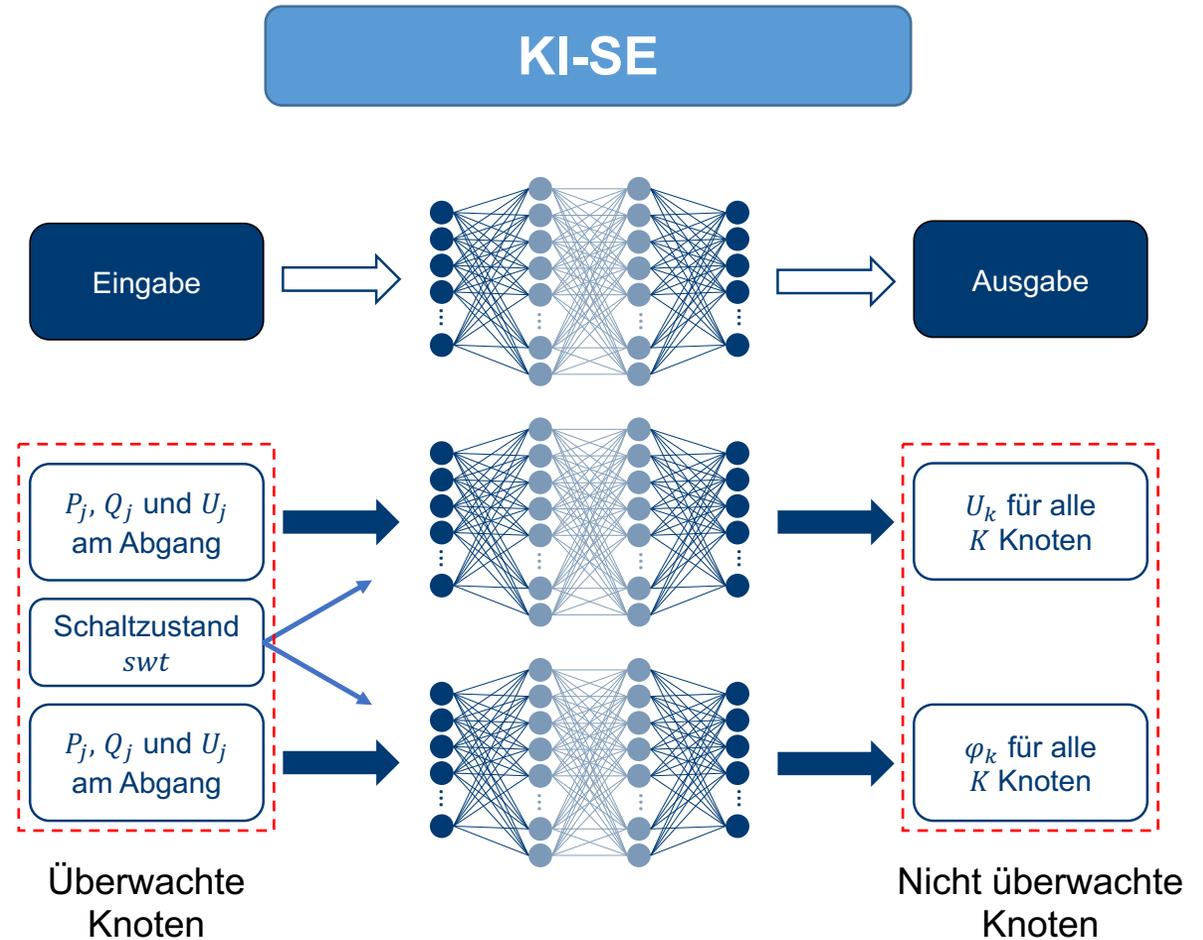
KI-Systeme



KI-LF



KI-SE



Gefördert durch:



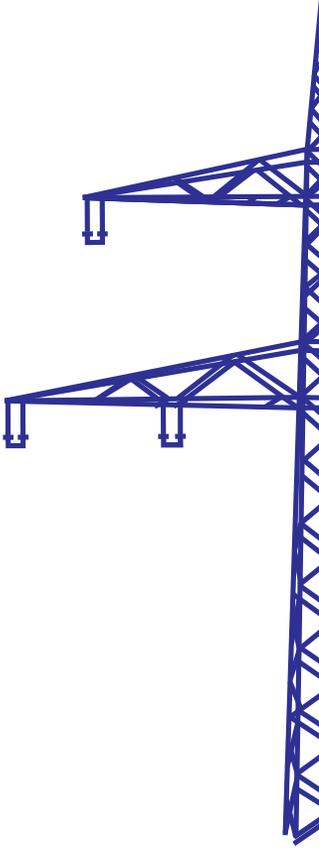
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



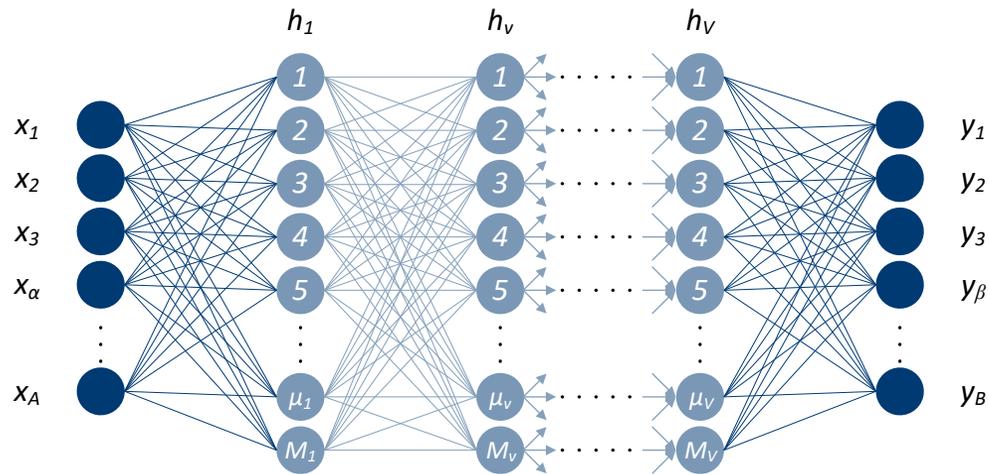
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Simulation und Ergebnisse



Hyperparameteroptimierung



Eingabeneuronen

$$\alpha = 1 \dots A, \alpha \in \mathbb{N}$$

Ausgabeneuronen

$$\beta = 1 \dots B, \beta \in \mathbb{N}$$

Verdeckte Schichten

$$v = 1 \dots V, v \in \mathbb{N}$$

Neuronen in
verdeckten Schichten

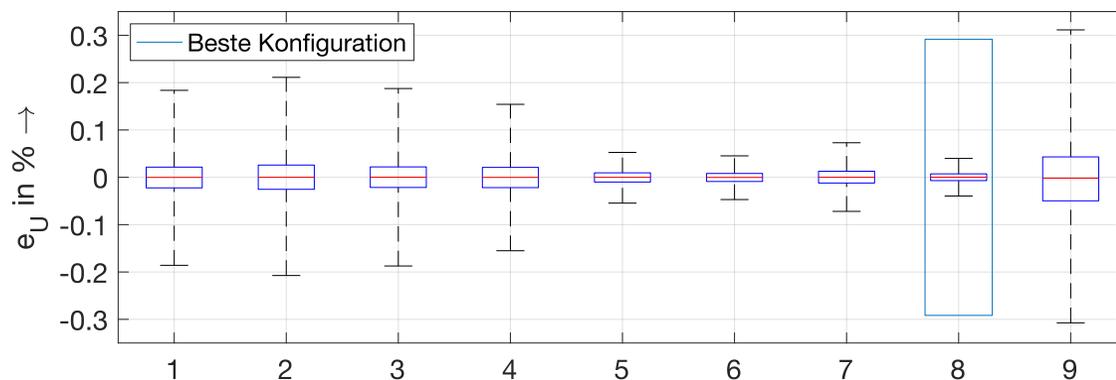
$$\mu = 1 \dots M, \mu \in \mathbb{N}$$

ID	KI-LF				KI-SE			
	M	V	bs	ϕ	M	V	bs	ϕ
1	2683	3	10	ReLU	20	3	10	ReLU
2	4600	4	10	ReLU	40	4	10	ReLU
3	2683	2	10	ReLU	20	2	10	ReLU
4	2683	2	128	ReLU	20	2	128	ReLU
5	2683	3	128	ReLU	20	3	128	ReLU
6	2683	4	128	ReLU	20	4	128	ReLU
7	2683	4	64	ReLU	20	4	64	ReLU
8	2683	4	64	sigmo	20	4	64	sigmo
9	2683	4	32	sigmo	20	4	32	sigmo

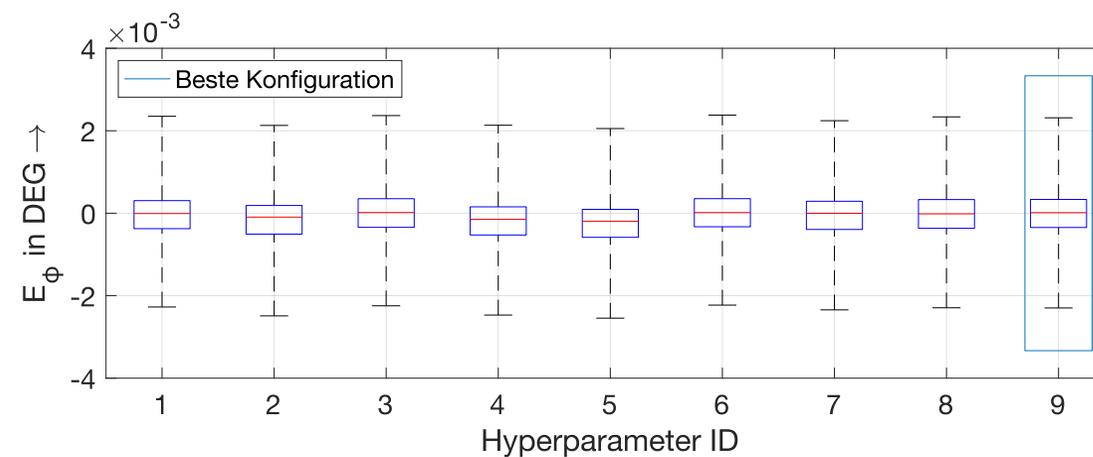
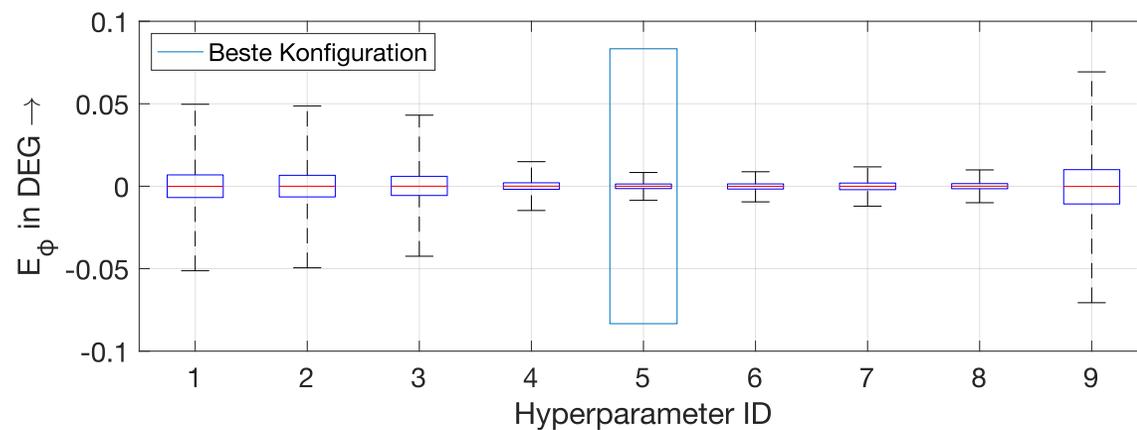
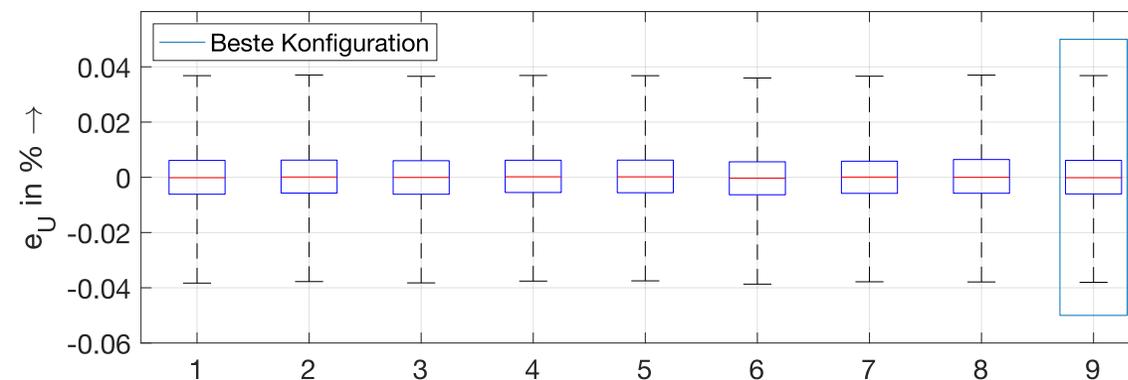
sigmo: sigmoid-Funktion, ReLU: Rectified Linear Unit, bs: Batch Größe, ϕ : Aktivierungsfunktion

Hyperparameteroptimierung

KI-LF



KI-SE

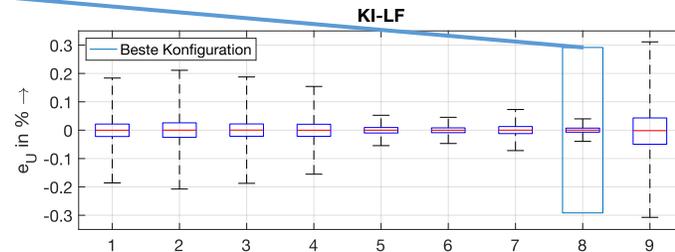


Boxplots: 95 % Quantil

Hyperparameteroptimierung

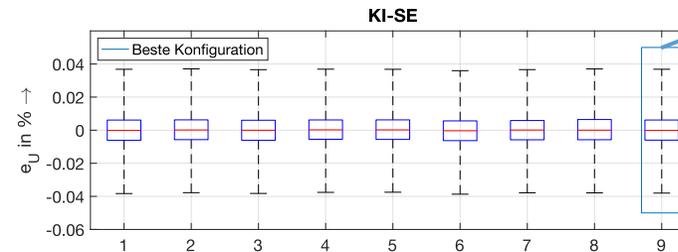
-0,0395 | 0,0399
0,0003

$|e_U| \leq 0,0399 \%$

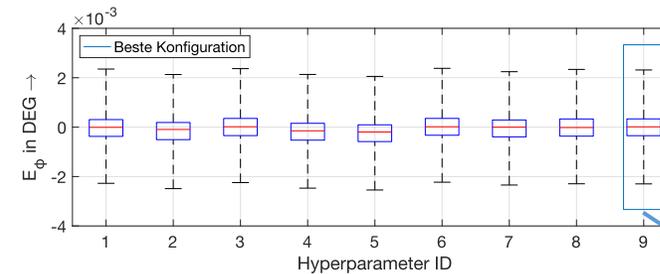
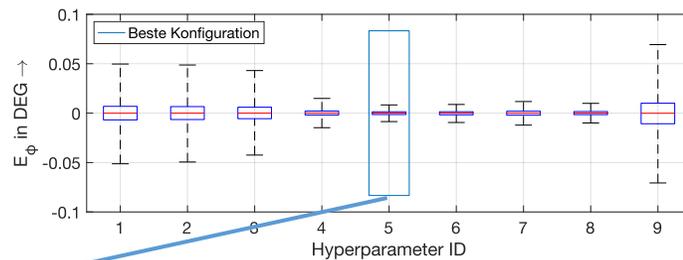


-0,0380 | 0,0368
-0,00014

$|e_U| \leq 0,038 \%$



$|E_\phi| \leq 0,0086^\circ$

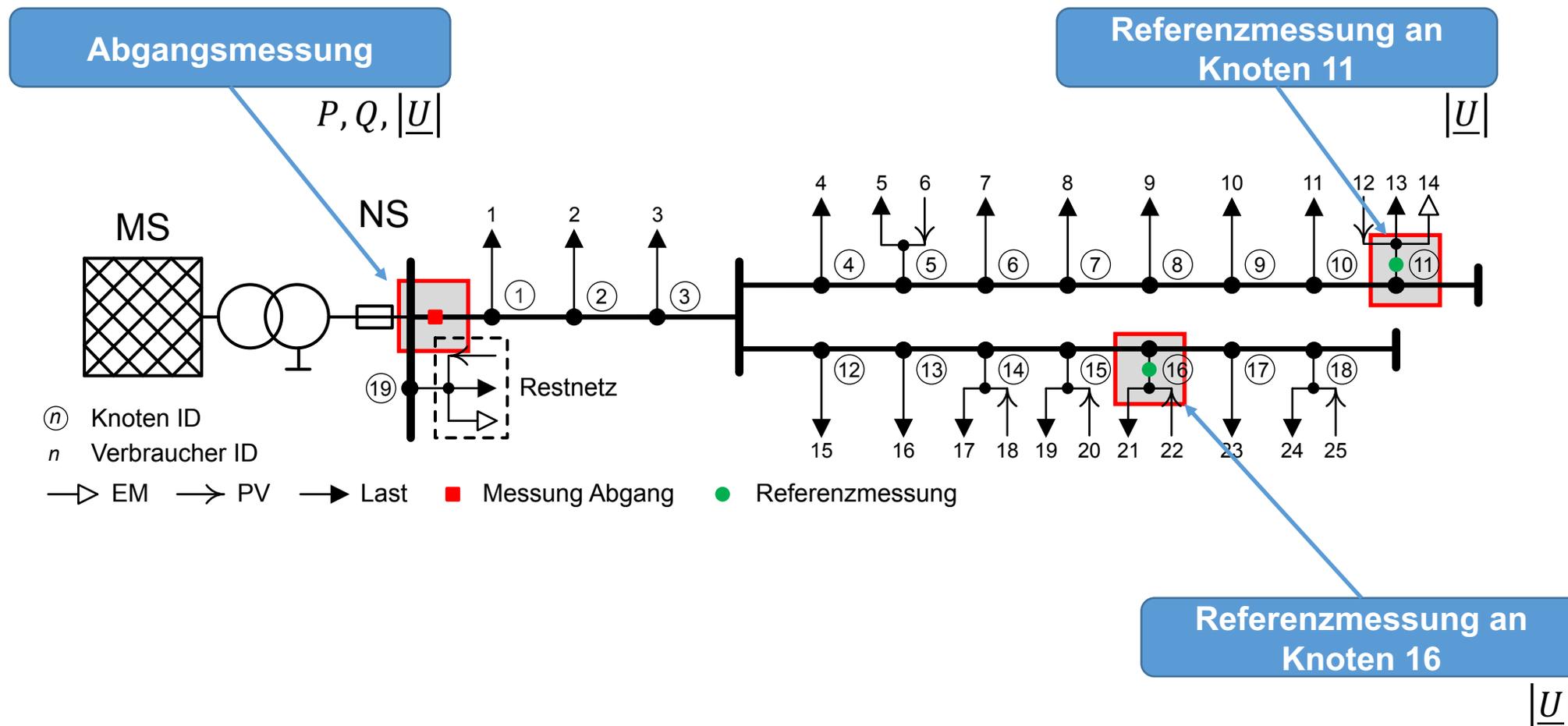


$|E_\phi| \leq 0,0023^\circ$

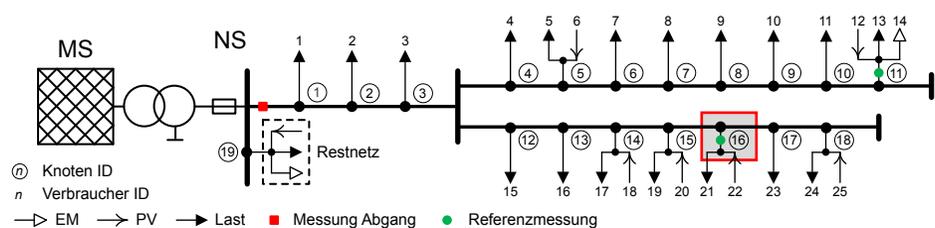
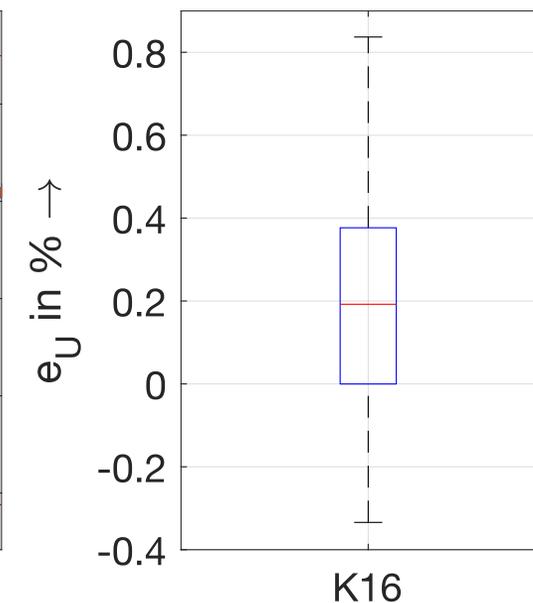
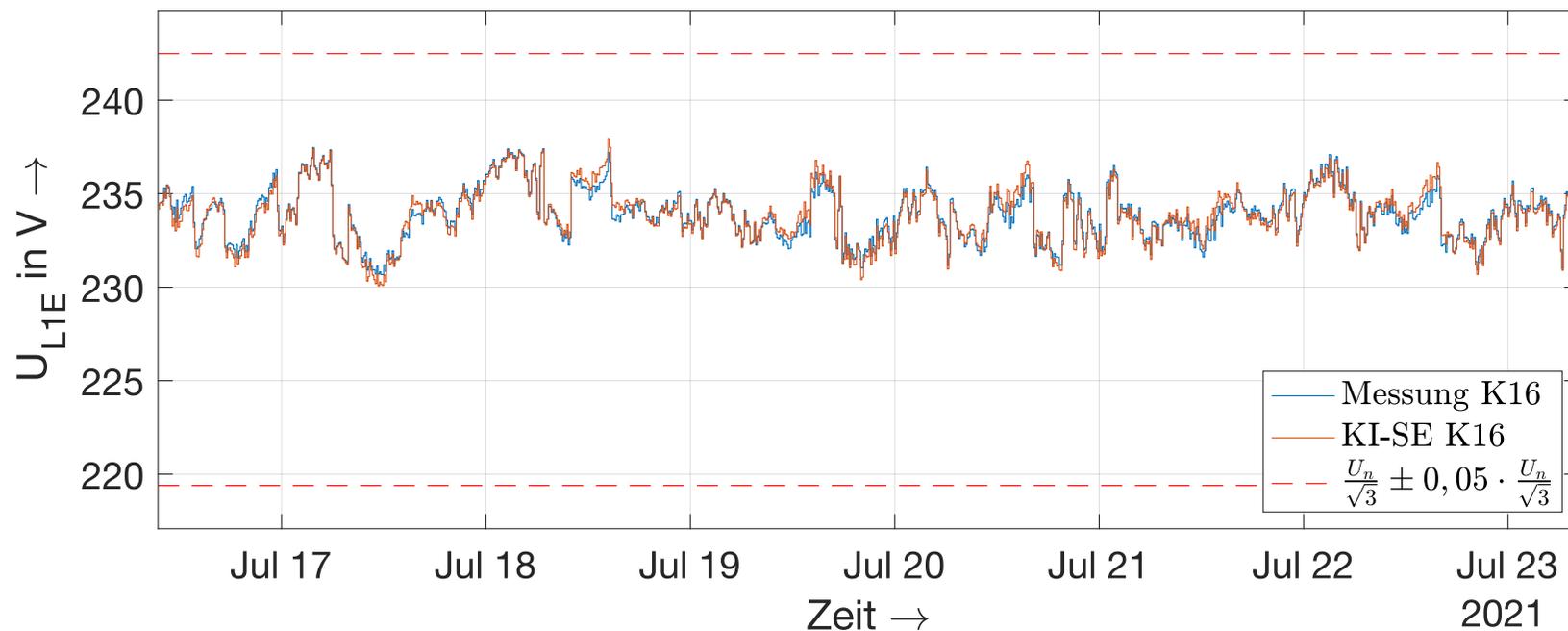
-1,4e-6
-0,0086 | 0,0083

-0,013e-3
-0,0023 | 0,0023

KI-basierte Netzzustandsschätzung Ergebnisse



KI-basierte Netzzustandsschätzung Ergebnisse



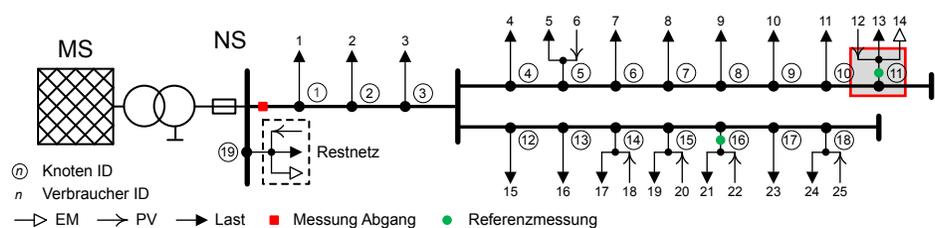
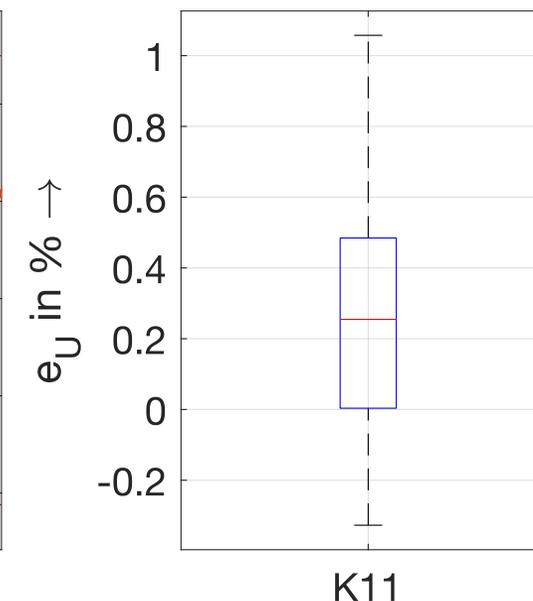
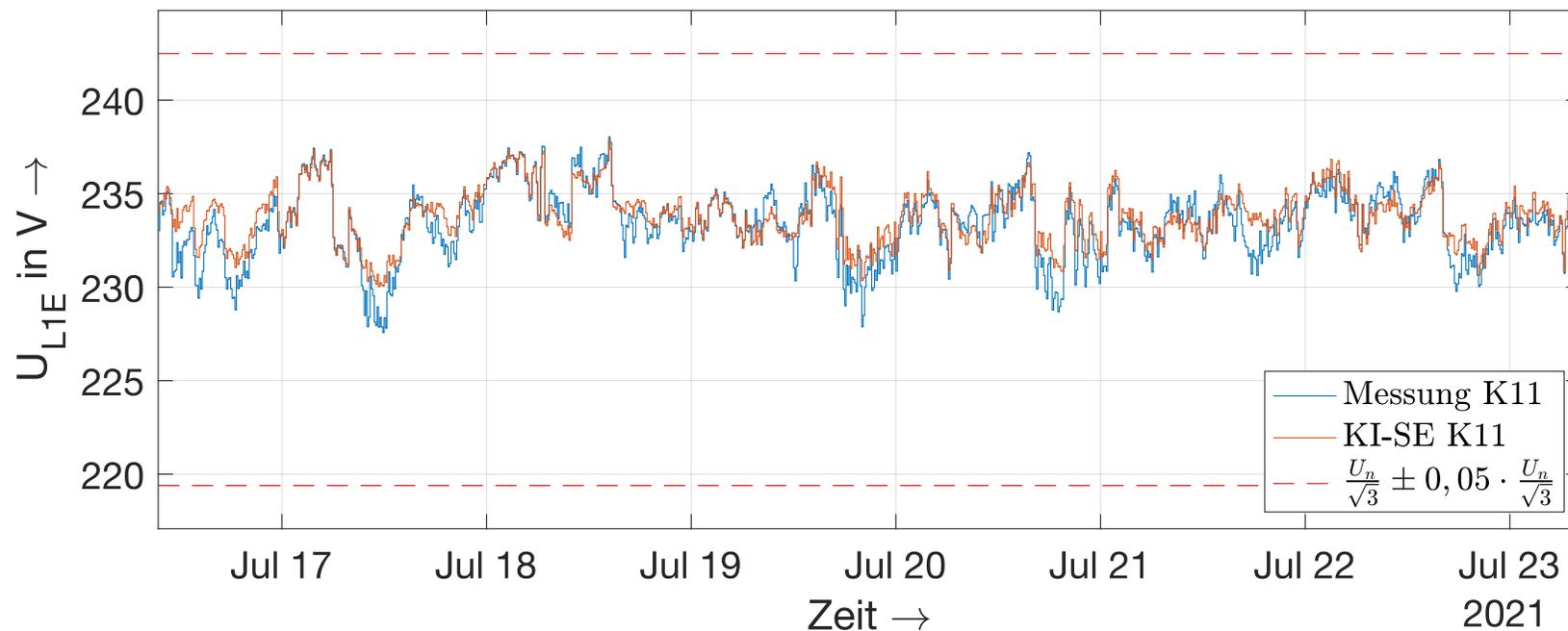
$$e_U = \frac{U_{L1E,KI} - U_{L1E,Mess}}{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}$$

Validierungskriterium:

$$-1\% \leq e_U \leq 1\%$$

Boxplots: 95 % Quantil

KI-basierte Netzzustandsschätzung Ergebnisse



$$e_U = \frac{U_{L1E,KI} - U_{L1E,Mess}}{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}$$

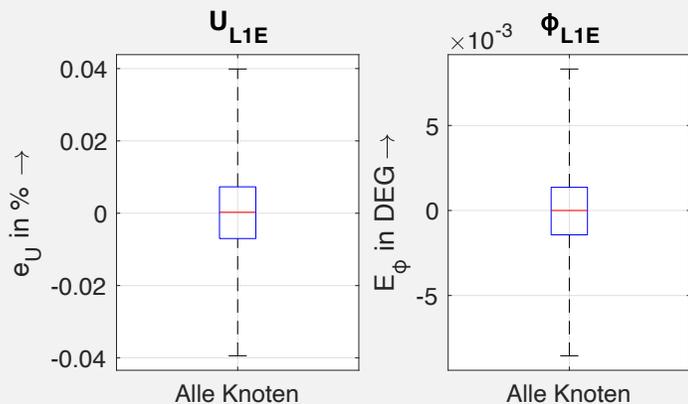
Validierungskriterium:

$$-1\% \leq e_U \leq 1,1\%$$

Boxplots: 95 % Quantil



KI-basierte Lastflussberechnungen Ergebnisse

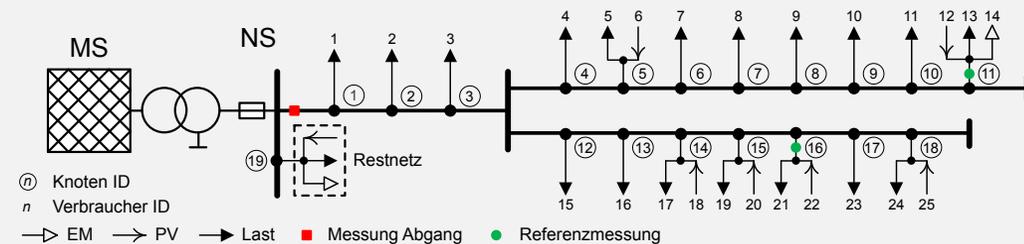
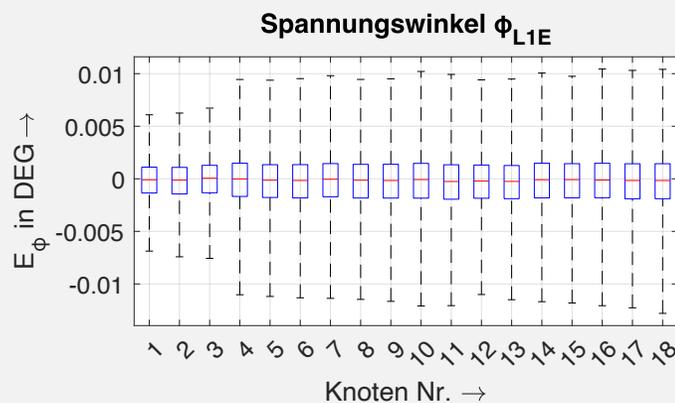
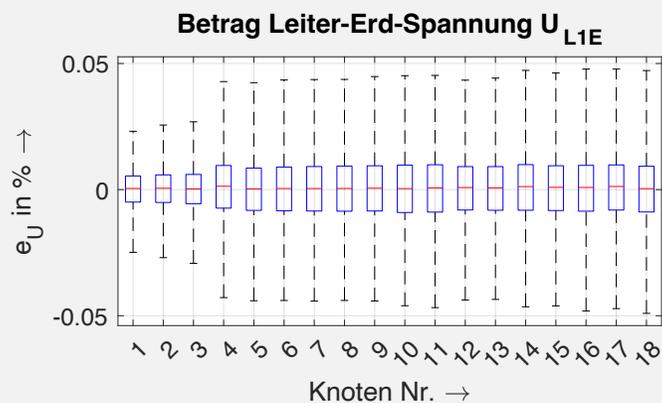
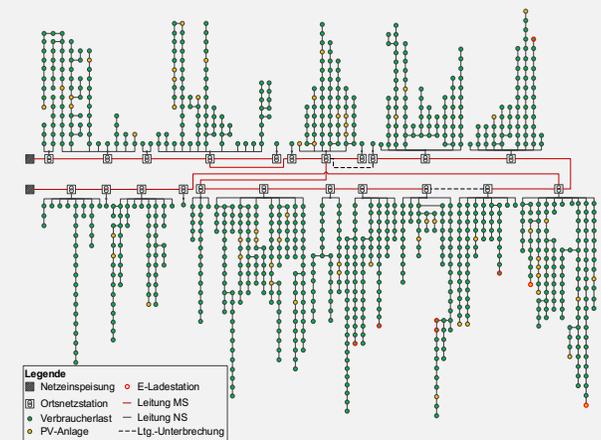


$$E_\phi = \phi_{L1E,KI} - \phi_{L1E,Testdaten}$$

$$e_U = \frac{U_{L1E,KI} - U_{L1E,Mess}}{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}$$

$|e_U| \leq 0,4 \%$

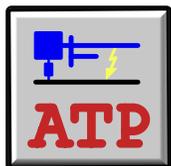
$|E_\phi| \leq 0,009^\circ$



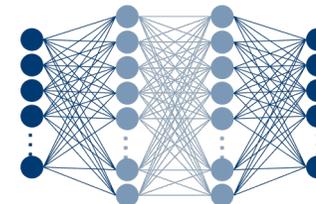
$|e_U| \leq 0,5 \%$

$|E_\phi| \leq 0,013^\circ$

Vergleich der Rechenzeiten



ATPDesigner

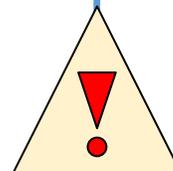


KI-System

➔ Eine Lastflussberechnung $\approx 5,9 \text{ s}$

➔ 35.040 Lastflussberechnungen $\approx 57 \text{ h}$

- Anwenderorientiertes Netzberechnungsprogramm
- Darstellung der Netzgrafik mit Anzeige der Rechenergebnisse
- Verschiedene Import- und Exportfunktionen
- Analyse der Rechenergebnisse



➔ Eine Lastflussberechnung $\approx 0,036 \text{ s}$

➔ 35.040 Lastflussberechnungen $\approx 50,76 \text{ s}$

- „Nur“ die Berechnung des vollständigen Netzzustandes (Spannungsbeträge und Spannungswinkel)
- Generierung der Trainingsdaten und Training der KI-Systeme müssen mitberücksichtigt werden (**offline**)
- **Sehr gut geeignet für die Durchführung von Lastflussberechnungen im Onlinebetrieb (z.B. zur Ableitung von Handlungsempfehlungen)**
- **Sehr gut geeignet für die Berechnung vieler Szenarien (z.B. im Rahmen der Netzplanung)**

Zusammenfassung und Ausblick

• KI in der Netzplanung

- Erweiterung der konventionellen Netzplanung durch **Schnelligkeit** des Rechenprozesses
- Einsatz für **Niederspannungsnetze**
- Wahrscheinlichkeitsbasierte Auslastungsanalysen
- Untersuchung anlagenspezifischer Prognoseprofile

35.040 Lastflussberechnungen
 $\approx 50,76 \text{ s}$

• KI in der Netzführung

- **KI-basierte Netzzustandsschätzung** liefert hinreichend genaue Ergebnisse, auch bei einer geringen Anzahl an Messsystemen
- **Validierung** der Ergebnisse mit Messwerten erfolgreich abgeschlossen
- **Steigerung der Genauigkeiten** durch die Weiterentwicklung der KI-Modelle

$-1 \% \leq e_U \leq 1,1 \%$

$-1 \% \leq e_U \leq 1 \%$

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.



htw saar



**Stadtwerke
Saarlouis**
Mit Energie. Mit Sicherheit. Mit uns.



VSE
Verteilnetz GmbH



Kontakt



Selina Prinz

energis-Netzgesellschaft mbH

selina.prinz@energis-netzgesellschaft.de

Tel.: +49 681 4030-1229

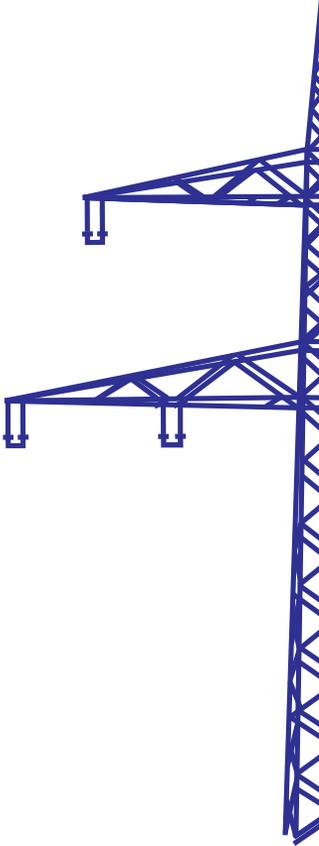


Andreas Winter

Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes - Institut für Elektrische Energiesysteme

andreas.winter@htwsaar.de

Tel.: +49 681 5867-356



Referenzen



- Bundesregierung (2021): Klimaschutzpaket der EU-Kommission, [online] <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/klimaschutzpaket-der-eu-kommission-1942402#:~:text=Europa%20soll%20bis%202050%20klimaneutral,diese%20Ziele%20erstmals%20gesetzlich%20fest.&text=Die%20Vorsch%20A4ge%20m%20BCssen%20noch%20mit,Rat%20verhandelt%20und%20beschlossen%20werden> [abgerufen am 11.02.2022].
- A. Winter, M. Igel, und P. Schegner, „Application of artificial intelligence in power grid state analysis and -diagnosis“, in NEIS 2020. Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, Hamburg, 15.09 2020, S. 128–133.
- A. Winter, M. Igel, und P. Schegner, „Supervised Learning Approach for State Estimation in Distribution Systems with missing Input Data“, in 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Espoo, Finland, Okt. 2021, S. 1–5. doi: 10.1109/ISGTEurope52324.2021.9639949.
- Wikipedia: Complete neuron cell diagram de.svg, [online] https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg [abgerufen am 12.02.2022].
- A. Winter, B. Brandherm, M. Igel, P. Schegner, „Klassische Stromnetzberechnung in Kombination mit künstlicher Intelligenz zur Analyse und Diagnose von Stromverteilnetzen“, in Tutorial Schutz- und Leittechnik: Online Preview 2022, Berlin, 2022.