

Analyse der Effizienzverluste von Wechselrichtern in PV-Portfolios durch Auswertung von Betriebsdaten

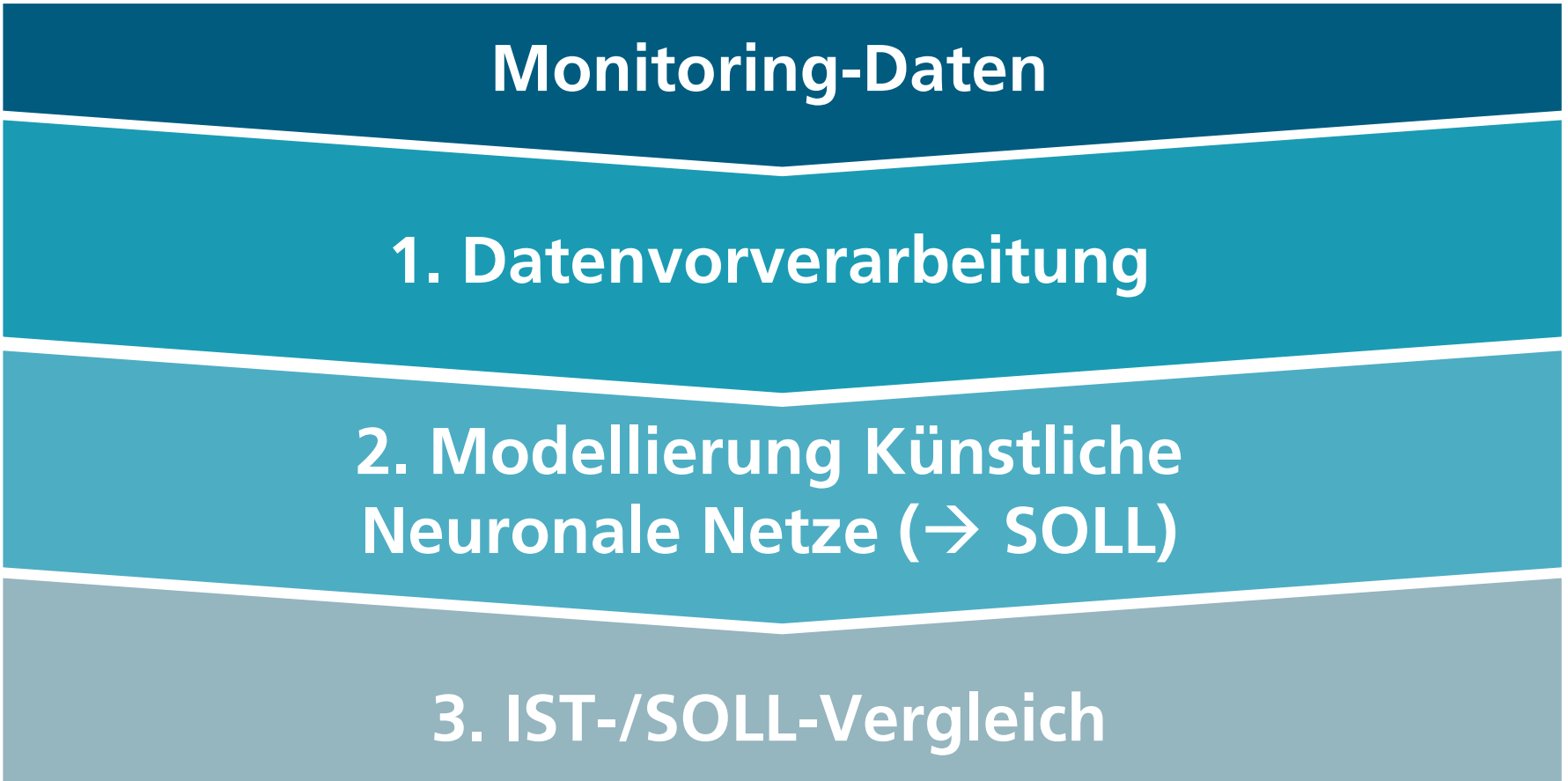
David Daßler¹, Stephanie Malik¹, Dharm Patel, Andreas Dietrich², Jan Spihola², Kai Kaufmann³, Carsten Hennig⁴, Robert Klengel¹, Carola Klute¹, Matthias Ebert¹

1 Fraunhofer IMWS, Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen, Walter-Hülse-Straße 1, 06120 Halle
2 DiSUN, Deutsche Solarservice GmbH, Mielestraße 2, 14542 Werder (Havel)
3 DENKweit GmbH, Blücherstraße 26, 06120 Halle
4 saferay holding GmbH, Rosenthaler Str. 34-35, 10178 Berlin



MOTIVATION UND ZIELSTELLUNG

- Ertragseinbußen in PV-Systemen → Ursachenanalyse zur Fehlerdiagnose am PV-Generator und Wechselrichter
- Langfristige Verschlechterung der Wechselrichter-Effizienz ($= P_{AC}/P_{DC}$) über die Betriebszeit bisher wenig erforscht → jährliche Degradation der Wechselrichter-Effizienz in %/a wenig bekannt
- Physikalische Modelle berücksichtigen keine Software-Algorithmen, keine internen Steuerungsprozesse und kein dynamisches MPP-Tracking → Einsatz von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN)
- Ziel: Datengetriebene Analyse der Wechselrichter-Effizienz mittels Betriebsdaten und KNN (Maschinelles Lernen)



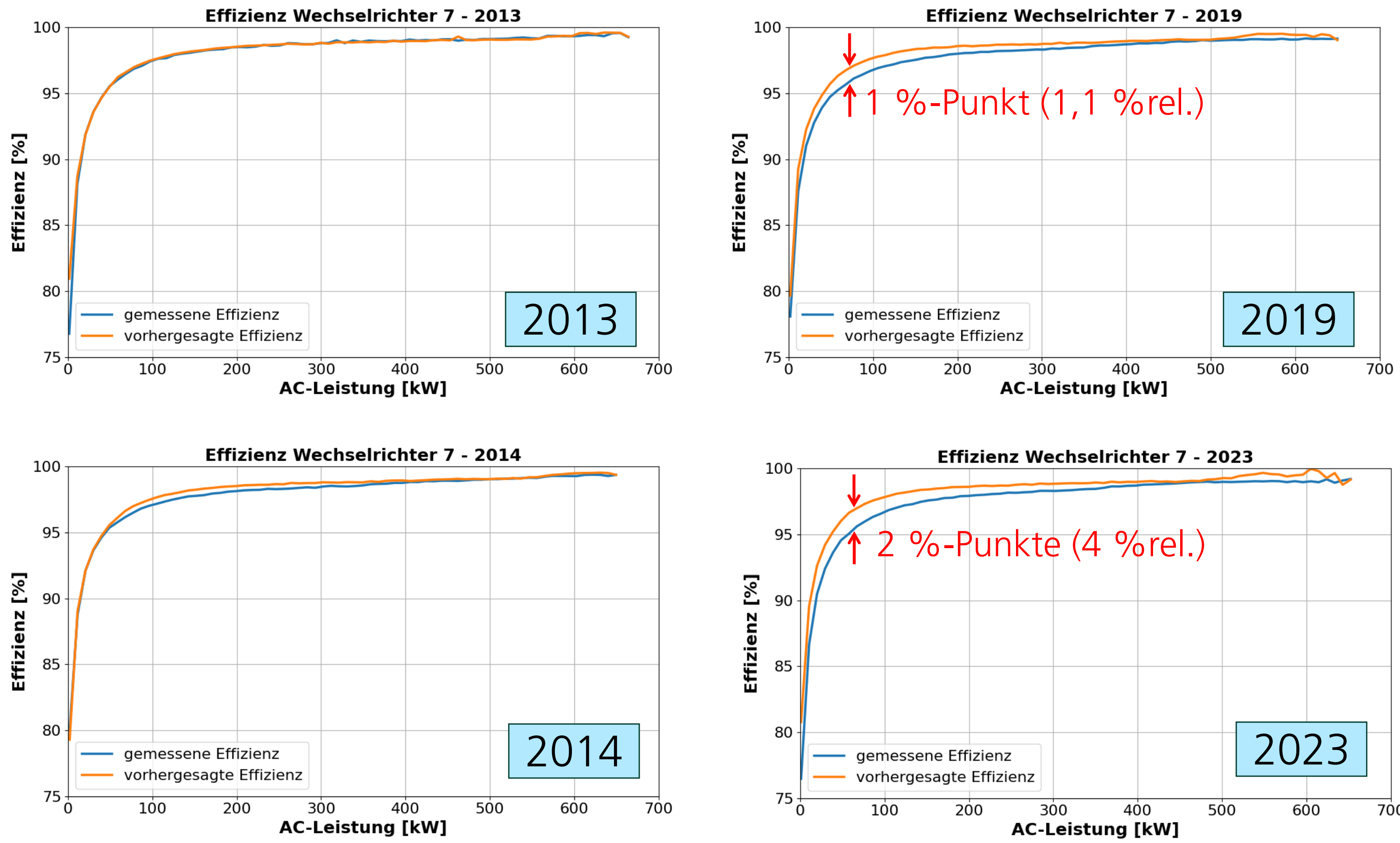
Vorgehensweise

1. DATENVORVERARBEITUNG

- **Datensatz:** PV-System bestehend aus 9 Zentralwechselrichtern (jeweils 630 kW Nennleistung) in moderatem Klima, installiert in Deutschland, 12 Jahre Betriebsdaten (2012 bis 2023) in minütlicher Auflösung
- **Erstellung des Trainingsdatensatzes:**
 - Zeiträume ohne Nachtwerte (Elevation der Sonne $> 0^\circ$)
 - Betriebsdaten ohne Fehlermeldungen und Abregeln
 - Klare und bewölkte (leicht und komplett) Bestrahlungszustände (basierend auf einer Klassifizierung der Bestrahlungsstärke [1] nach dem Bewölkungsgrad: klar, leicht bewölkt, bewölkt, variabel)

3. IST-/SOLL-VERGLEICH

- Bestimmung der Effizienzkurve durch die jeweiligen Mediane (Breite: rund 10 kW)



Jährliche Übersicht der vorhergesagten und gemessenen Werte der Wechselrichter-Effizienz eines Wechselrichters in Bezug zur jeweiligen Ausgangsleistung

SCHLUSSFOLGERUNGEN

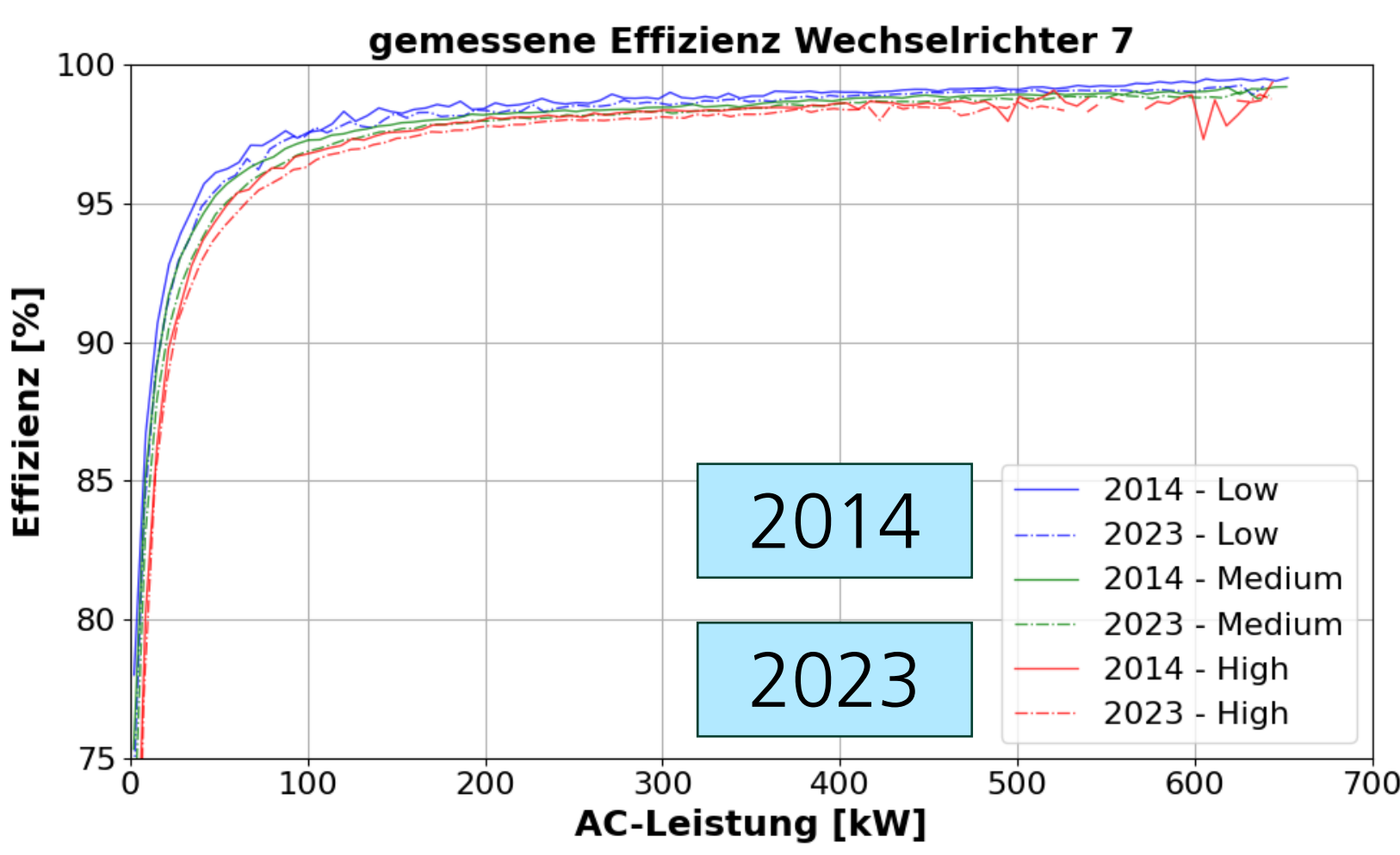
- **Langfristige Verluste:** Schleichende Abnahme der Wechselrichter-Effizienz um 2 %-Punkte bzw. 4 %rel. nach zehn Jahren, besonders im Bereich P_{AC} bis 300 kW
- **Spannungsebenen:** Effizienzverluste treten in verschiedenen Spannungsebenen auf, mit einer Verschiebung zu niedrigeren Werten
- **Generator-Seite:** Hohe Verluste der P_{DC} von bis zu 12% (geringer als die Effizienzverluste), während die V_{DC} weitgehend stabil bleibt
- ➔ **Detaillierte, datengestützte Auswertungen von Betriebsdaten sind wichtig für die Optimierungen der Fehlererkennung!**

2. MODELLIERUNG MITTELS KÜNSTLICHER NEURONALER NETZE

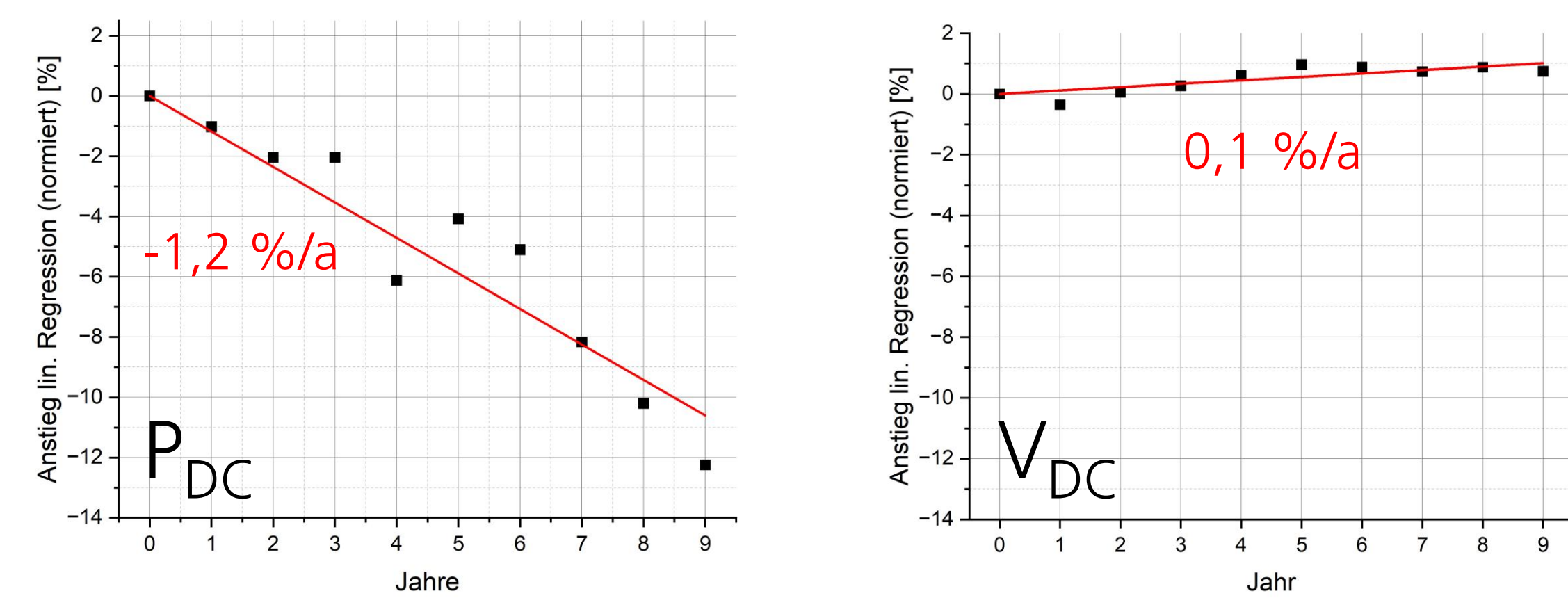
Tab. 1: Datensatz und Genauigkeit der Modellierung

Training	<div>Eingangsgrößen:</div> <ul style="list-style-type: none">■ Bestrahlungsstärke (geneigte Ebene)■ Umgebungstemperatur■ Sonnenposition (Azimut, Elevation) <div>Zeitraum: 2014 (1 Jahr, nach Inbetriebnahme), 1-min Auflösung</div>	<div>Ausgangsgrößen:</div> <ul style="list-style-type: none">■ DC-Strom (I_{DC})■ DC-Spannung (V_{DC})■ DC-Leistung (P_{DC})■ AC-Leistung (P_{AC})■ Wechselrichter-Effizienz										
Ergebnis	<div>$MAPE \text{ [\%]} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right 100$<p>$x_i$... gemessener Wert und</p><p>\hat{x}_i ... vorhergesagter Wert zum Zeitpunkt i</p></div>	<div>MAPE (Training):</div> <table><tr><th>I_{DC} [%]</th><th>V_{DC} [%]</th><th>P_{DC} [%]</th><th>P_{AC} [%]</th><th>Effizienz [%]</th></tr><tr><td>7,65</td><td>1,14</td><td>7,64</td><td>9,36</td><td>1,21</td></tr></table>	I_{DC} [%]	V_{DC} [%]	P_{DC} [%]	P_{AC} [%]	Effizienz [%]	7,65	1,14	7,64	9,36	1,21
I_{DC} [%]	V_{DC} [%]	P_{DC} [%]	P_{AC} [%]	Effizienz [%]								
7,65	1,14	7,64	9,36	1,21								

Gegenüberstellung der vorhergesagten und gemessenen Werte (hier: P_{AC} für das Jahr 2014)



Gemessene Wechselrichter-Effizienzen 2014 & 2023 in Bezug zur jeweiligen Ausgangsleistung; kategorisiert nach verschiedenen Spannungsebenen: Low (550 – 600 V), Medium (> 600 – 650 V) und High (> 650 – 700 V)



Durchschnittliche jährliche Degradation des PV-Generators von P_{DC} (links) und V_{DC} (rechts) für einen Wechselrichters über die Betriebslaufzeit

[1] Tina, G.M., et al. Analysis of forecast errors for irradiance on the horizontal plane. The International Renewable Energy Congress IREC. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.05.031

Besonderes Dankeschön:



Diese Arbeit wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Projekt »robStROM« (FKZ: 03EE1163B).

