Promotionsvorhaben

mit dem Titel

„Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen mit geringer Messwertaufnahme: Anforderungen und Umsetzung“

von

M. Sc. Robert Brandalik

an der

TU Kaiserslautern

Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement

Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow

Stand der Dissertation:

Die wissenschaftlichen Arbeiten sind abgeschlossen. Eine Einreichung beim Fachbereich Elektrotechnik an der TU Kaiserslautern erfolgt zeitnah.

M. Sc. Robert Brandalik
TU Kaiserslautern
Lehrstuhl für
Energiesysteme und Energiemanagement
Erwin-Schrödinger-Straße
67663 Kaiserslautern
Tel.: 0176-7007-3922
Mail: brandalik@eit.uni-kl.de

Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow
TU Kaiserslautern
Lehrstuhl für
Energiesysteme und Energiemanagement
Erwin-Schrödinger-Straße
67663 Kaiserslautern
Tel.: 0631-205-2021
Mail: wellssow@eit.uni-kl.de

M. Sc. Robert Brandalik
Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement
TU Kaiserslautern
brandalik@eit.uni-kl.de

Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen mit niedrigredundanter Messwertaufnahme: Anforderungen und Umsetzung

1. Herausforderungen für die Energiewirtschaft & den Betrieb von Niederspannungsnetzen (NS-Netzen)

Emissionen von CO_2 und anderen Treibhausgasen zu reduzieren

Wachsenden Anteil an Erzeugungsanlagen & leistungsstarken Verbrauchern aus dem Verkehrs- und Wärmesektor

* NS-Netze immer näher an ihren Betriebsgrenzen
* Zurzeit keine Messwerterfassung vorhanden
* Einführung von **Smart Metern** (modernen Messeinrichtungen)
* Herausforderung: **Datenschutz!**
* Vorgestellte **Lösung:** Zustandsschätzung + Ersatzwerte

Die zukünftige Netzführung von NS-Netzen ist ohne die Erhebung von privaten Verbraucherdaten möglich!

2. Notwendigkeit der Zustandsschätzung in NS-Netzen

Klassische Lösung für die Probleme in NS-Netzen

* Netzausbau und lokale Spannungsregler
* bald nicht mehr die **wirtschaftlich optimale Lösung**

Neue Lösungen **benötigen Zustandsschätzung**

* Demand Side Management & neue Marktmodelle
* Sektorkopplung & zellularer Ansatz

In der Arbeit werden folgende Fragen beantwortet:

Wie ist die Zustandsschätzung in NS-Netzen umzusetzen?

Wie präzise kann der Zustand bei einem sehr großen Anteil an Ersatzwerten geschätzt werden?

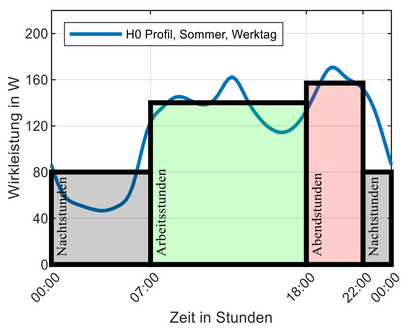
3. Entwicklung einer Zustands-schätzung für NS-Netze

Ansatz für Zustandsschätzung

* unsymmetrisch, linear & effizient

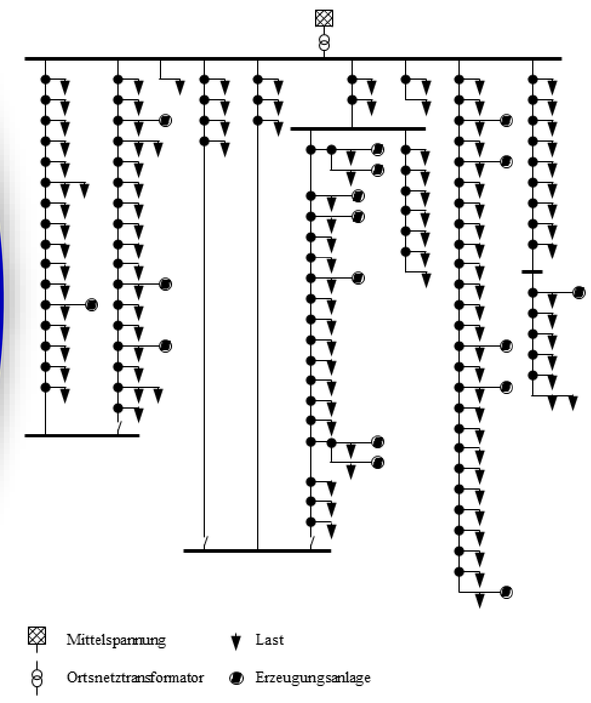
Ausschnitt (Erklärung in der Arbeit)

$$P_v^{ij} \approx \sum_{w=1}^{3} U_{\mathrm{ref}} \cdot \left[\left(G_{v,w}^{ij} \cdot c_{v,w,\mathrm{ref}}^{ij} + B_{v,w}^{ij} \cdot s_{v,w,\mathrm{ref}}^{ij} \right) \cdot \left(U_w^i - U_w^j \right) \right] - \ldots$$
$$\sum_{w=1}^{3} U_{\mathrm{ref}}^2 \cdot \left[\left(-G_{v,w}^{ij} \cdot s_{v,w,\mathrm{ref}}^{ij} + B_{v,w}^{ij} \cdot c_{v,w,\mathrm{ref}}^{ij} \right) \cdot \left(\varphi_w^i - \varphi_w^j \right) \right]$$
$$= f_{\mathrm{linear}} \left(U_w^i, U_w^j, \varphi_w^i, \varphi_w^j \right)$$



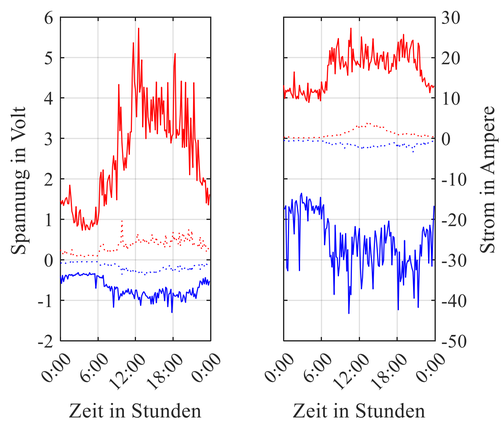
Ersatzwerte

4. Feldtest und simulative Umgebung

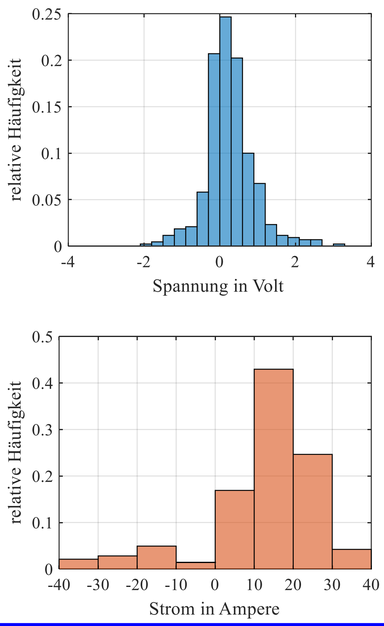


5. Bewertung des Ansatzes

Abweichungen in Simulationen



Abweichungen im Feldtest



6. Fazit & Ausblick

Die **Abweichungen** sind für den Netzbetrieb **vertretbar**

* Vorgeschlagene Zustandsschätzung & Ersatzwertgenerierung **anwendbar!**

Algorithmus öffentlich verfügbar

* **Open-Source** über Github

Fazit

Es ist auch ohne die Erhebung personenbezogener Messdaten möglich, NS-Netze zu überwachen.

Ausblick

* Regelstrategien für NS-Netze

CheapFlex

Symposium „Energie und Umwelt – Meine Idee für morgen“
der Stiftung Energie & Klimaschutz
Stuttgart, 23. November 2018

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen mit niedrigredundanter Messwertaufnahme: Anforderungen und Umsetzung

1 Einleitung

1.1 Herausforderungen für die Energiewirtschaft und den Betrieb von Niederspannungsnetzen

Globale Erwärmung und Umweltbelastung dürfen nicht mehr ignoriert werden. Vor allem gilt es die Emissionen von CO_2 und anderen Treibhausgasen zu reduzieren. Mit dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (engl. *United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC) und der Gründung des gleichnamigen Sekretariats in 1992 wurde der erste Schritt in Richtung eines nachhaltigen Wirtschaftswachstums und somit auch einer nachhaltigen Energiewirtschaft gemacht. Durch das UNFCCC geprägt, trat 2005 das Kyoto-Protokoll und 2016 das aktuelle Pariser Abkommen in Kraft. Ab 2020 verpflichten sich mit dem Pariser Abkommen die Vertragsländer den durchschnittlichen Anstieg der Erdtemperatur unter 2 °C und falls möglich unter 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu halten. Auf nationaler Ebene werden die Zielsetzungen mit dem Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) geregelt. Zielvorgabe ist es, bis 2050 den Anteil des erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energien auf 80 % des Bruttostromverbrauchs zu steigern. Die Welt befindet sich erst am Anfang des Klimaschutzprozesses. Die vorliegende Arbeit ist durch diesen Hintergrund motiviert.

1.2 Zweck und Ziel der Arbeit

Zweck der Arbeit ist es einen Beitrag zum Netzbetrieb und zur Netzplanung von zukünftigen Niederspannungs- (NS-)Netzen zu liefern. Durch den wachsenden Anteil an Erzeugungsanlagen und leistungsstarken Verbrauchern aus dem Verkehr- und Wärmesektor kommen NS-Netze immer näher an ihre Betriebsgrenzen. Weil bei der NS-Netzplanung bisher keine Messwerterfassung vorgesehen war, können Netzbetreiber Grenzverletzungen nicht erkennen. Um dieses zu ändern, werden deutsche Anschlussnutzer in Zukunft flächendeckend mit modernen Messeinrichtungen (auch als intelligente Zähler oder *Smart Meter* bezeichnet) ausgestattet sein. Diese sind in der Lage über eine Kommunikationseinheit, das Smart-Meter-Gateway, Messdaten an die Netzbetreiber zu senden. Werden Messdaten aber als personenbezogene Netzzustandsdaten deklariert, so ist aus Datenschutzgründen eine Erhebung dieser Daten weitgehend untersagt. Ziel dieser Arbeit ist es eine Zustandsschätzung zu entwickeln, die auch bei niedrigredundanter Messwertaufnahme für den Netzbetrieb von NS-Netzen anwendbare Ergebnisse liefert. Neben geeigneten Algorithmen zur Zustandsschätzung ist dazu die Generierung von Erzsatzwerten im Fokus. Erst wenn NS-Netze mit Hilfe der Zustandsschätzung beobachtbar sind, können darauf aufbauende Konzepte zur Regelung entwickelt werden, um die Energiewende zu unterstützen.

Die Arbeit soll beweisen, dass die zukünftige Netzführung von NS-Netzen ohne die Erhebung von private Verbraucherdaten möglich ist.

2 Notwendigkeit der Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen

Netzausbau und lokale Spannungsregler lösen heutzutage die meisten Probleme in NS-Netzen. Diese werden aber irgendwann an Grenzen kommen, wo sie nicht mehr die wirtschaftlich optimale Lösung darstellen. Zusätzlich ist zu beachten, dass Netzausbau von NS-Netzen nicht die übergeordneten Netze entlastet. Soll das volle Potenzial der Verteilung und Übertragung von elektrischer Energie genutzt werden, müssen alternative Maßnahmen wie z. B. Demand Side Management in Betracht gezogen werden. Dieses ist nur machbar, wenn der Netzzustand zu jedem Zeitpunkt mit ausreichender Genauigkeit bestimmbar ist. Das Bestimmen des Netzzustands ist auch zwingend erforderlich, um neue Marktmodelle einzuführen oder innovative Konzepte wie die Sektorkopplung oder den zellularen Ansatz umzusetzen.

Mit dieser Arbeit sollen die folgenden Fragen beantwortet werden: Wie soll die Zustandsschätzung in NS-Netzen umgesetzt werden? Wie präzise kann der Zustand bei einem sehr großen Anteil an Ersatzwerten geschätzt werden? Es sei erwähnt, dass auch wenn die Ersatzwertgenerierung zum jetzigen Zeitpunkt nur aus deutscher Sicht relevant ist, es nicht ausgeschlossen ist, dass durch Initiativen von Bevölkerung oder Datenschutzgremien auch andere Länder eine rigorose Begrenzung von Messdatenerhebung bei Verbrauchern (Haushalten) einführen.

3 Entwicklung einer Zustandsschätzung für Niederspannungsnetze

3.1 Erwünschte Eigenschaften einer Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen

Die Zustandsschätzung ist Stand der Technik in höheren Spannungsebenen. Im Vergleich zu allen anderen Spannungsebenen werden NS-Netze aber überwiegend unsymmetrisch betrieben. Die Zustandsschätzung in NS-Netzen sollte daher in der Lage sein unsymmetrisch zu rechnen. Nichtsdestotrotz schlagen manche Autoren symmetrische Ansätze vor, mit der Begründung, dass die resultierenden Fehler vernachlässigbar sind. Symmetrische Ansätze werden im Rahmen der Simulationen auf Anwendbarkeit bewertet.

Die Zustandsschätzung ist ein iteratives Verfahren, welches ggf. nicht konvergieren muss oder zu nicht physikalisch plausiblen Ergebnissen führen kann. In Übertragungsnetzen werden darum die Ergebnisse der Zustandsschätzung durch ausgebildetes Personal bewertet, bevor sie weiterverwendet werden. Durch die große Anzahl an NS-Netzen wäre eine solche Netzüberwachung praktisch nicht möglich. Der Automatisierungsgrad muss viel höher sein, was voraussetzt, dass die Zustandsschätzung immer vertrauenswürdige Ergebnisse zur Verfügung stellt. Dies setzt voraus, dass sie konvergiert.

Die Zustandsschätzung in Übertragungsnetzen wird auf leistungsstarken Rechner durchgeführt, in NS-Netzen wird dieses kostenbedingt nicht der Fall sein können. Die Zustandsschätzung muss so effizient wie möglich sein, ein Aspekt der im Fokus der vorliegenden Arbeit liegt.

3.2 Ansätze verschiedener Autoren

In Rahmen dieser Arbeit werden Ansätze zur Zustandsschätzung verschiedener Autoren vorgestellt. Davon ausgewählte werden mit Hilfe der Simulationen verglichen und bewertet. Abhängig von der Modellbildung können die Ansätze in symmetrische oder unsymmetrische eingeteilt werden. Weiterhin können sie abhängig vom eingesetzten Algorithmus auf klassische, lineare, probabilistische, auf Metaheuristiken basierende und auf neuronalen Netzen basierende Ansätze aufgeteilt werden.

3.3 Vorgeschlagener Ansatz

Mit Berücksichtigung der erwünschten Eigenschaften aus Abschnitt 3.1 wurde in dieser Arbeit ein in Leitergrößen berechneter linearer Ansatz vorgeschlagen. Der in Matlab programmierte Algorithmus des Ansatzes wurde mit einem Minimalbeispiel auf Github (https://github.com/lik1212/TaylorSE_AMA) öffentlich zur Verfügung gestellt. Weitere Untersuchungen der Arbeit fokussieren sich auf die numerische Optimierung des Ansatzes. Unter anderem wird vorgeschlagen wie der Algorithmus eingesetzt werden soll, um bei Änderungen der Netztopologie oder des Messumfangens effizient zu rechnen, um die Kosten von zukünftigen Überwachungs- und Regeleinheiten in NS-Netzen zu reduzieren.

4 Vorgeschlagene Ersatzwertgenerierung

Personenbezogene Messwerte wie Leistungsmessungen, die den Verbrauch und somit das Verhalten von Personen nachbilden, dürfen nach dem Gesetz nicht mehr erhoben werden. Die nicht personenbezogenen Spannungsmessungen von Verbrauchern reichen aber nicht aus, um eine Zustandsschätzung durchzuführen. Um trotzdem in der Lage zu sein den Zustand des Netzes zu bestimmen, müssen Ersatzwerte eingesetzt werden. In dieser Arbeit werden Ansätze zur Ersatzwertgenerierung verschiedener Autoren vorgestellt. Des Weiteren werden zwei neue Ansätze eingeführt.

Beim ersten der neuen Ansätze werden auf Basis probabilistische Überlegungen Leistungswerte von Verbrauchern geschätzt und in die Zustandsschätzung mit einbezogen. Bei dem zweiten neuen Ansatz wird angenommen, dass zusätzlich zu den Spannungsmessungen die Leistungen am Ortsnetztransformator gemessen sind. Diese Leistungen entsprechen ungefähr der in Summe bezogenen Leistungen der Verbraucher, wenn die Leistungen der Erzeugungsanlagen herausgerechnet werden. Die Summe der Leistungen der Verbraucher wird auf die einzelnen Verbraucher aufgeteilt und eine Zustandsschätzung wird durchgeführt. Die resultierenden Spannungswerte der Zustandsschätzung werden mit den gemessenen Spannungswerten

verglichen. Auf Basis der Unterschiede werden die Leistungen erneut auf die Verbraucher verteilt, dieses Mal jedoch präziser. Der Prozess wird wiederholt, bis keine Verbesserungen in den Unterschieden mehr auftreten.

5 Bewertung des Ansatzes in simulativer Umgebung

Die Simulationen sind auf zwei Untersuchungen aufgeteilt. Im ersten Teil werden verschiedene Ansätze zur Zustandsschätzung bewertet und mit dem neu eingeführten Ansatz verglichen. Im zweiten Teil werden die verschiedenen Ansätze zur Ersatzwertgenerierung in die Zustandsschätzung mit einbezogen und deren Ergebnisse bewertet. Die Untersuchungen werden mit 14 synthetischen, einem von IEEE vorgeschlagenen und zwei realen Netzmodellen durchgeführt. Eingesetzt wurden (i) Zeitreihen von gemessenen Haushalten und Erzeugungsanlagen einer zwei Jahre langen Messkampagne, (ii) von IEEE vorgeschlagene Zeitreihen und (iii) Zeitreihen, die ein *worst-case* Szenario im Netz nachbilden sollen.

Beim Einsatz der gemessenen Zeitreihen am realen Netzmodell aus Abbildung 1, sind in Abbildung 2 die Ergebnisse der vorgeschlagenen Zustandsschätzung mit und ohne den Einsatz von Ersatzwerten dargestellt. Für den Fall mit Ersatzwerten wurde die in Kapitel 4 zuerst definierte Ersatzwertgenerierung eingesetzt. Für den Fall ohne Ersatzwerte wurde angenommen, dass die wahren Leistungswerte bekannt sind. Die Ergebnisse zeigen jeweils für Strom und Spannung den Fehlerbereich ohne Ersatzwerte (gestrichelte Linien) und mit Ersatzwerten (durchgezogene Linien) für jeden Tageszeitpunkt. Die Fehler sind definiert als die Differenz zwischen geschätzten und wahren Werten. Für den Zweck der Erkennung von Grenzwertverletzungen reichen die Genauigkeiten des Verfahrens aus.

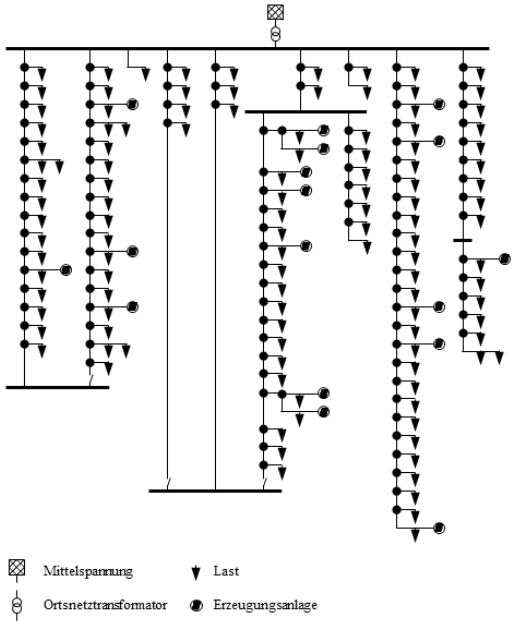


Abbildung 1: Netzmodell eines realen NS-Netzes

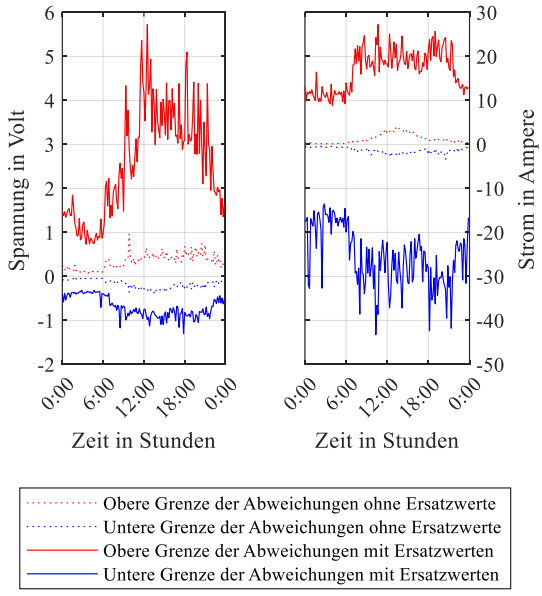
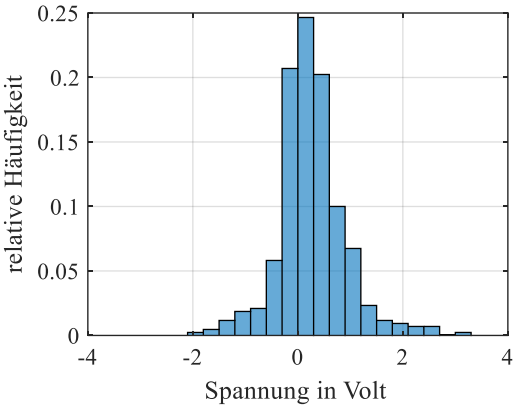


Abbildung 2: Ergebnisse der Simulationen

6 Bewertung des Ansatzes im Feldtest

Im realen NS-Netz aus Abbildung 1 wurde eine Messkampagne durchgeführt, um die vorgeschlagene Zustandsschätzung mit Ersatzwertgenerierung im Feldtest zu bewerten. Die Messungen am Ortsnetztransformator, zusätzliche Messungen an einzelnen Verbrauchern sowie die generierten Ersatzwerte wurden als Eingangsdaten für die Zustandsschätzung eingesetzt. Die Ergebnisse der Zustandsschätzung wurden mit präzisen Messdaten einer Referenzmessung über zwei Wochen verglichen. Die Abweichungen zwischen den Referenzwerten und den geschätzten Werten sind in Abbildung 3 dargestellt. Auch hier ist zu bemerken, dass die Genauigkeiten für die Erkennung von Grenzwertverletzungen ausreichen.

a) Abweichungen der Spannungen



b) Abweichungen der Ströme

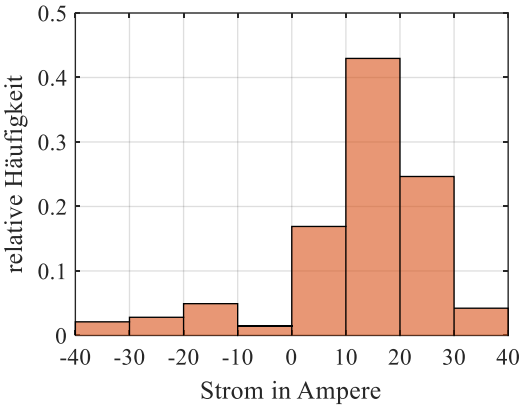


Abbildung 3: Feldtest Ergebnisse

7 Ausblick

Auch ohne die Erhebung personenbezogener Messdaten werden Netzbetreiber in der Lage sein NS-Netze zu überwachen. Dabei wird es wichtig sein die möglichen Abweichungen der Zustandsschätzung als Sicherheitsbereich zu den Grenzwerten zu berücksichtigen.

Ob die Genauigkeiten aber für Regelstrategien ausreichen ist fraglich. Ein Aspekt, der in dieser Arbeit nicht betrachtet wurde, ist, dass Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen ggf. auch gemessen werden dürfen. Für diesen Fall werden die Genauigkeiten der Zustandsschätzung besser und möglicherweise anwendbar für Regelstrategien.

Der öffentlich zugängige Algorithmus der vorgeschlagenen Zustandsschätzung wird auch in Zukunft gepflegt und weiterentwickelt.

ES+EM
Energy Systems +
Energy Management

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN

Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen mit niedrigredundanter Messwertaufnahme: Anforderungen und Umsetzung

Energie-Campus 2018

der Stiftung Energie & Klimaschutz

Stuttgart, 23. November 2018

Robert Brandalik

1. Herausforderungen für die Energiewirtschaft & den Betrieb von Niederspannungsnetzen (NS-Netzen)

- Emissionen von **CO_2** und anderen Treibhausgasen zu reduzieren
- Wachsenden Anteil an **Erzeugungsanlagen** & leistungsstarken **Verbrauchern** aus dem Verkehrs- und Wärmesektor
  - NS-Netze immer näher an ihren **Betriebsgrenzen**
  - Zurzeit **keine Messwerterfassung** vorhanden
  - Einführung von **Smart Metern** (modernen Messeinrichtungen)
  - Herausforderung: **Datenschutz**!
  - Vorgestellte **Lösung**: Zustandsschätzung + Ersatzwerte
- **Die zukünftige Netzführung von NS-Netzen ist ohne die Erhebung von privaten Verbraucherdaten möglich!**

2. Notwendigkeit der Zustandsschätzung in NS-Netzen

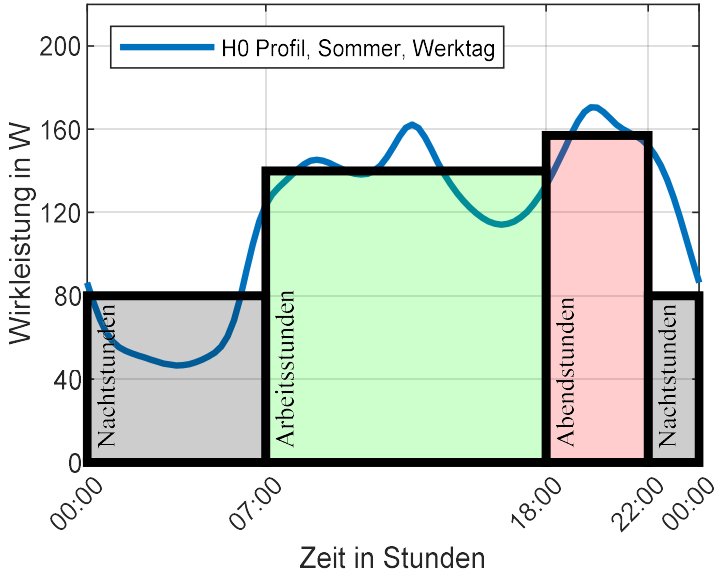
- Klassische Lösung für die Probleme in NS-Netzen
  - Netzausbau und lokale Spannungsregler
  - bald nicht mehr die **wirtschaftlich optimale Lösung**
- Neue Lösungen **benötigen Zustandsschätzung**
  - Demand Side Management & neue Marktmodelle
  - Sektorkopplung & zellularer Ansatz
- In der Arbeit werden folgende Fragen beantwortet:
- **Wie ist die Zustandsschätzung in NS-Netzen umzusetzen?**
- **Wie präzise kann der Zustand bei einem sehr großen Anteil an Ersatzwerten geschätzt werden?**

3. Entwicklung einer Zustandsschätzung für NS-Netze

- Ansatz für **Zustandsschätzung**
  - unsymmetrisch
  - **linear**
  - **effizient**
- Ausschnitt (Erklärung in der Arbeit)

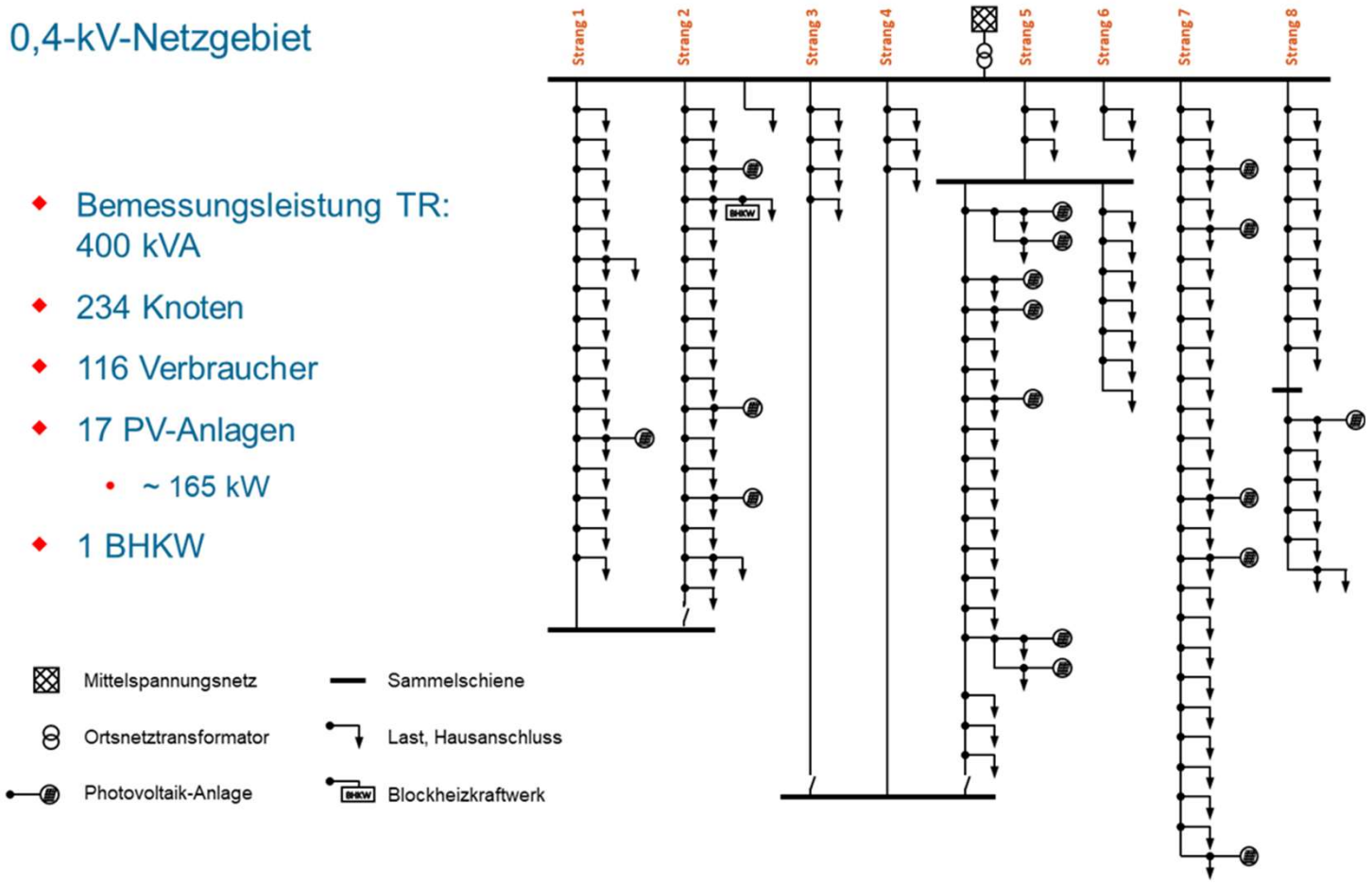
$$P_v^{ij} \approx \sum_{w=1}^{3} U_{\text{ref}} \cdot \left[\left(G_{v,w}^{ij} \cdot c_{v,w,\text{ref}}^{ij} + B_{v,w}^{ij} \cdot s_{v,w,\text{ref}}^{ij} \right) \cdot \left(U_w^i - U_w^j \right) \right] - \ldots$$
$$\sum_{w=1}^{3} U_{\text{ref}}^2 \cdot \left[\left(-G_{v,w}^{ij} \cdot s_{v,w,\text{ref}}^{ij} + B_{v,w}^{ij} \cdot c_{v,w,\text{ref}}^{ij} \right) \cdot \left(\varphi_w^i - \varphi_w^j \right) \right]$$
$$= f_{\text{linear}} \left(U_w^i, U_w^j, \varphi_w^i, \varphi_w^j \right)$$

- Ansatz für **Ersatzwertgenerierung**



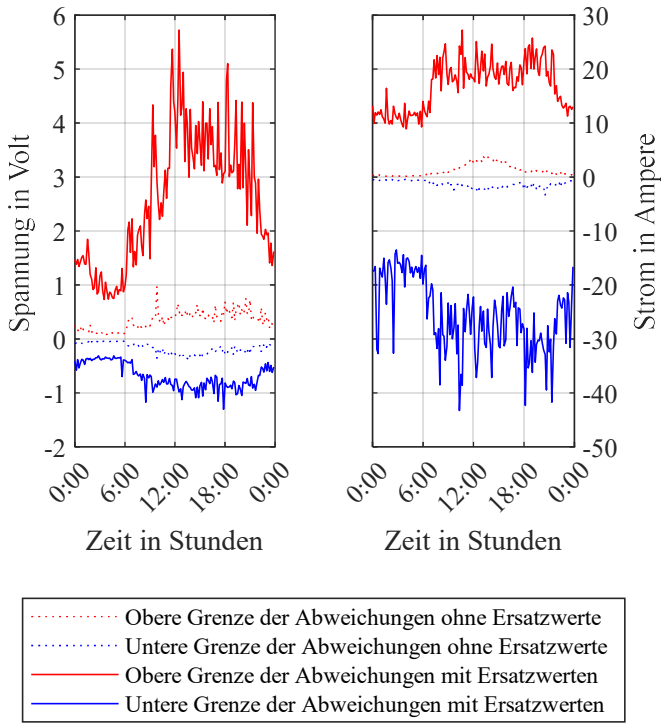
4. Feldtest und simulative Umgebung

- 0,4-kV-Netzgebiet
  - Bemessungsleistung TR: 400 kVA
  - 234 Knoten
  - 116 Verbraucher
  - 17 PV-Anlagen
    - ~ 165 kW
  - 1 BHKW

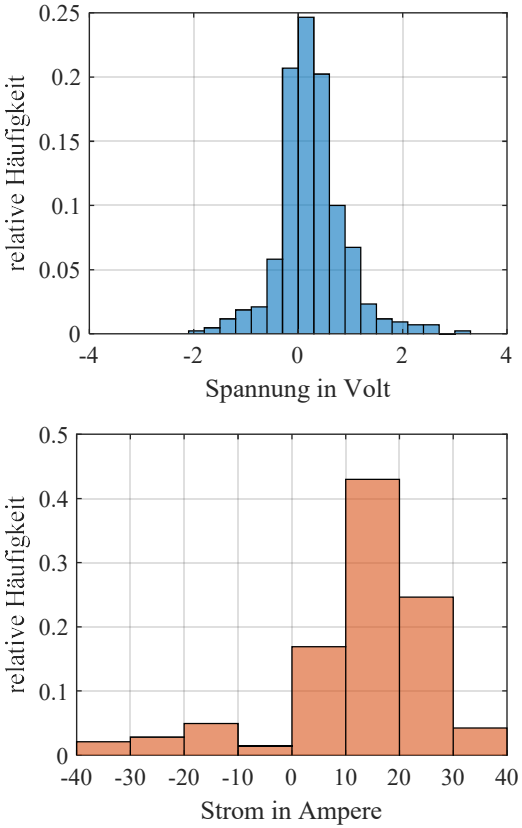


5. Bewertung des Ansatzes

- **Abweichungen in Simulationen**



- **Abweichungen im Feldtest**



6. Fazit & Ausblick

- Die **Abweichungen** sind für den Netzbetrieb **vertretbar**
  - Vorgeschlagene Zustandsschätzung & Ersatzwertgenerierung **anwendbar**!
- Algorithmus öffentlich verfügbar
  - **Open-Source** über Github
- Fazit
  - **Es ist auch ohne die Erhebung personenbezogener Messdaten möglich, NS-Netze zu überwachen.**
- Ausblick
  - Regelstrategien für NS-Netze

ES+EM
Energy Systems +
Energy Management

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit