# Determination of the Line Parameters of Electrical Distribution Grids based on Smart Meter Data

## Abstract

Aufgrund der Dekarbonisierung des Energiesektors und der damit verbundenen Integration neuer elektrischer Verbraucher und Erzeuger wie Elektrofahrzeuge oder PV-Anlagen müssen Netzbetreiber zu einem aktiven Netzbetrieb übergehen. Dies umfasst die Steuerung sowohl flexibler Lasten als auch von Erzeugungsanlagen auf Grundlage von wichtigen Netzparametern wie der Ressourcenauslastung und der Knotenspannung. Daher werden zunehmend intelligente Zähler in die Niederspannungsebene integriert, um den Netzzustand anhand der erfassten Messdaten und der Netztopologie als Grundlage für das aktive Netzmanagement zu ermitteln. Ein derzeit bestehendes Problem ist jedoch, dass ein großer Teil der Leitungsparameter, wie etwa der Leitungswiderstand, nicht ausreichend digitalisiert und teilweise falsch ist, sodass unklar bleibt, bei welchen Strömen Leitungsüberlastungen auftreten. Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen unter Verwendung synthetisch generierter Smart-Meter-Daten untersucht diese Studie den Einfluss von Messunsicherheiten auf die Qualität der Bestimmung der Leitungsparameter mittels eines Ansatzes, der auf multipler linearer Regression und dem Spannungsabfall entlang von Leitungen basiert. Diese Studie zeigt, dass die Bestimmung der Leitungsparameter anhand von Messdaten mit dem hier vorgestellten Ansatz in der Praxis für Leitungen mit hohen Spannungsabfällen anwendbar ist.

## Einleitung

Um die gesetzlichen Klimaziele zu erreichen, wird der Ausbau dezentraler Energieerzeugungsanlagen und neuer Verbrauchstypen, insbesondere auf den unteren Spannungsebenen, stark vorangetrieben. Diese Anlagen und Erzeuger stellen jedoch für die ursprünglich passiv ausgelegten Verteilnetze eine Herausforderung dar, da sie zu einer höheren Auslastung der Betriebsmittel oder zu Verletzungen des Spannungsbandes führen können. Daher ist ein Wechsel zu aktiv betriebenen Verteilnetzen auf Basis von Netzzustandsbestimmungen notwendig.

Intelligente Zähler werden zunehmend auf der Niederspannungsebene installiert, um den Zustand der Netze – zum Beispiel durch Zustandsabschätzungen – zu ermitteln und damit eine aktive Steuerung der Systeme zu ermöglichen. Diese zeichnen in regelmäßigen Abständen die elektrischen Parameter (Spannung, Strom, Wirk- und Blindleistung) des Netzes auf. Dabei ist zu beachten, dass Messwerte stets Messunsicherheiten unterliegen, die sich durch den weiteren Verarbeitungsprozess fortpflanzen. Der Netzzustand kann dann auf Grundlage der Messwerte und der Netztopologie ermittelt werden. Allerdings ist die Netztopologie heutzutage oft nicht in ausreichender Qualität digitalisiert. Folglich fehlen wesentliche Parameter wie die Leitungsimpedanzen oder liegen nur ungenau vor. Verfahren zur Bestimmung der Netztopologie und der Leitungsparameter sind daher Gegenstand aktueller Forschung.

Dieser Artikel untersucht den Einfluss von Messunsicherheiten auf die Qualität der Bestimmung von Leitungsparametern. Dabei wird ein Verfahren zur Bestimmung der Leitungsparameter anhand des Spannungsabfalls entlang der Leitungen unter Verwendung multipler linearer Regression eingesetzt. Diese Studie nutzt synthetisch generierte Messdaten, um den Einfluss von Messunsicherheiten unterschiedlicher Größenordnungen zu untersuchen.

Der Aufbau des Artikels ist wie folgt: In Abschnitt 2 wird ein Überblick über verschiedene in der Forschung eingesetzte Verfahren zur Bestimmung von Leitungsparametern gegeben, wodurch sich der Forschungsbeitrag dieser Studie von der bestehenden Literatur abgrenzt. Abschnitt 3 erläutert die Datenbasis dieser Studie und die Prozessschritte zur Bestimmung der Leitungsparameter im Detail. Abschnitt 4 gibt einen Überblick über die verschiedenen Ergebnisse und zieht erste Schlussfolgerungen zum Einfluss von Messunsicherheiten auf die Bestimmung der Leitungsparameter. Abschließend werden die Ergebnisse in Abschnitt 5 zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

## Stand der Forschung

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Bestimmung von Leitungsparametern in Verteilnetzen. Eine Vielzahl von Algorithmen ermittelt die Leitungsparameter, den ohmschen Wirkanteil R und den reaktiven Widerstand X, auf Basis historischer Spannungs-, Wirk- und Blindleistungsmesswerte von intelligenten Zählern. Darauf aufbauend können entweder Regressionsmodelle oder neuronale Netze zur Schätzung der Parameter eingesetzt werden.

Zunächst wird in Referenz [1] eine numerische Methode zur Identifikation der Netztopologie und zur Bestimmung der Leitungsparameter vorgestellt. Dabei dienen historische Spannungs-, Wirk- und Blindleistungsamplituden an den Netzknoten als Datengrundlage. Eine ungefähre Schätzung der Topologie und der Leitungsparameter erfolgt auf Basis linearer Regression. In einem weiteren Schritt werden die Parameter R und X als Variablen in der Leistungsverlaufsberechnung und näherungsweise an ihre tatsächlichen Werte in einer speziellen Version der Newton-Raphson-Iteration angepasst. Zusätzlich wird die Topologie bei jeder Iteration korrigiert. Das vorgestellte Verfahren wird an den Mittelspannungsnetzen IEEE 33-Bus-Feeder und 123-Bus-Feeder mit realen Messwerten unter Berücksichtigung von Messunsicherheiten getestet. Daher können die Ergebnisse nicht auf die Niederspannungsebene übertragen werden.

In Referenz [2] wird ein Optimierungsverfahren zur Bestimmung von R und X unter der Annahme einer bekannten Netztopologie vorgestellt. Hierzu wird eine Kostenfunktion aus den beschriebenen nichtlinearen Gleichungen gebildet, deren Minimierung mittels Partikelschwarm-Optimierung optimale Ergebnisse für die Leitungsimpedanzen liefert. Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf realen Netzgebieten mit realen Messwerten, sodass keine allgemein gültigen Aussagen gemacht werden können.

In Referenz [3] wird ein Verfahren auf Basis eines neuronalen Netzes und stochastischen Gradientenabstiegs vorgestellt. Hierfür sind anfängliche Parameterschätzungen aus einem geografischen Informationssystem erforderlich, die optimiert werden. Physikalische Übergangsfunktionen auf Basis nichtlinearer Lastflussberechnungen werden entwickelt, um die Übergangsfunktionen auf Basis tiefer neuronaler Netze im grafischen neuronalen Netz zu ersetzen. Das Ergebnis des grafischen Lernmodells sind geschätzte Knotenspannungswerte der Smart-Meter-Systeme. Der Gradient der Verlustfunktion der Spannungswerte wird anschließend in Abhängigkeit von den Widerstands- und Reaktanzparametern der Leitungen mit einem iterativen Verfahren berechnet. Abschließend werden die Schätzungen der Leitungsparameter nach dem Prinzip des stochastischen Gradientenabstiegs berechnet, um die Abweichungen zwischen den aus dem grafischen Lernmodell generierten Spannungswerten und den tatsächlich gemessenen Spannungswerten zu minimieren. Das Verfahren berücksichtigt Messunsicherheiten, wird jedoch nur für IEEE 13- und 17-Bus-Feeder-Mittelspannungsnetze angewendet.

Abschließend stellt Referenz [4] ein Verfahren zur Bestimmung der Leitungsparameter R und X auf Basis eines multiplen linearen Regressionsmodells vor. Die mathematische Grundlage dieses Modells ist der linearisierte Spannungsabfall auf einer Leitung, der als multiples lineares Regressionsmodell verwendet wird. Das Verfahren zeigt Ergebnisse für ein Mittelspannungsnetz, einschließlich Niederspannungsnetzen, und berücksichtigt dabei das Vorhandensein von Messunsicherheiten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es verschiedene Methoden zur Bestimmung von Leitungsimpedanzen gibt, diese jedoch nicht auf einer öffentlich verfügbaren Datenbasis für die Niederspannungsebene beruhen. Die vorgestellten Methoden nutzen unterschiedliche Netzmodelle, bei denen unklar ist, ob sie die breite Masse real vorkommender Netzstrukturen repräsentieren. Aufgrund der Skalierbarkeit auch für größere Netzmodelle und der vergleichsweise einfachen Umsetzung in der Praxis wird in dieser Studie die Methode der multiplen linearen Regression nach Referenz [4] verwendet.

Im Vergleich zu den dargestellten Studien wird hier eine öffentlich verfügbare Datenbasis genutzt, die repräsentative Netzstrukturen auf der Niederspannungsebene abbildet [5]. Dadurch wird sichergestellt, dass die Ergebnisse reproduzierbar sind und keine Netzstruktur unberücksichtigt bleibt. Messunsicherheiten unterschiedlicher Größenordnungen werden den synthetisch erzeugten Messdaten hinzugefügt. Dadurch lässt sich der Einfluss von Messunsicherheiten in Sensitivitätsanalysen ermittelt und Anforderungen an die Messtechnik für die Umsetzung in der Praxis abgeleitet werden. Damit unterscheidet sich die vorgestellte Arbeit von der bestehenden Literatur.

## Daten und Methodik

In diesem Kapitel werden die Datenbasis und die Datenerzeugung für den Algorithmus zur Bestimmung der Leitungsparameter vorgestellt. Zunächst werden die verwendeten Netzmodelle und die synthetischen Lastprofile beschrieben. Im nächsten Schritt wird die Berechnung des Spannungsabfalls entlang der Leitungen sowie die Problemlösung mittels multipler linearer Regression erläutert.

### 3.1. Datenerzeugung

Diese Studie verwendet SimBench-Netze als Datengrundlage [5]. SimBench ist eine öffentlich verfügbare Datenbank synthetischer Netze, die auf Basis realer Netzstrukturen und -parameter entwickelt wurde. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verwendeten SimBench-Niederspannungsnetze und deren Eigenschaften. Die Niederspannungsnetze stehen in drei Szenarien zur Verfügung, wobei Szenario 0 der aktuellen Versorgungssituation in Deutschland entspricht. Szenarien 1 und 2 beschreiben zukünftige Versorgungssituationen mit einer erhöhten Anzahl dezentraler Erzeugungsanlagen, Batteriespeicher, Ladestationen und Wärmepumpen.

In den Niederspannungsnetzen werden ausschließlich Erdkabel als Leitungen verwendet, wobei innerhalb eines Netzes stets der gleiche Kabeltyp eingesetzt wird. Zwei verschiedene Kabeltypen mit

R\_1’ = 0{,}2089 \,\Omega/\mathrm{km},\, X\_1’ = 0{,}0706 \,\Omega/\mathrm{km} (Typ 1)

und

R\_2’ = 0{,}1489 \,\Omega/\mathrm{km},\, X\_2’ = 0{,}0597 \,\Omega/\mathrm{km} (Typ 2)

werden in den Netzmodellen verwendet.

Auf Basis probabilistischer Last- und Erzeugungsprofile wird eine jährliche Lastflussberechnung mit einer Zeitauflösung von 15 Minuten durchgeführt. Damit liegen die relevanten Netzzustandsdaten (Knotenspannungen, Leitungsströme, Wirk- und Blindleistungen) in ausreichender Qualität für alle Zeitschritte vor.

Um den Einfluss realer Messtechnik zu berücksichtigen, werden im Rahmen von Sensitivitätsanalysen statistische Messunsicherheiten zu den Knoten-Zeitreihen hinzugefügt. Die statistischen Messunsicherheiten werden als gaußverteilte Zufallszahlen simuliert. Dabei ist zu beachten, dass gemäß DIN EN 60359 [6] die in den Datenblättern der Messtechnik angegebenen Messunsicherheiten den maximal zulässigen Messunsicherheiten entsprechen. Um dies entsprechend abzubilden, werden die Messunsicherheiten in einem 3σ-Intervall abgebildet.

### 3.2. Spannungsabfall entlang von Leitungen

Auf Grundlage der gemessenen Spannungs-, Wirk- und Blindleistungswerte an den Knoten wird im folgenden Schritt der Spannungsabfall entlang der Leitungen berechnet. Dieser dient als Eingangsgröße für das multiple lineare Regressionsmodell.

Zunächst muss bei der Berechnung des Spannungsabfalls entlang der Leitung beachtet werden, dass der Betrag des komplexen Spannungsabfalls nicht identisch mit der Differenz der Beträge der Knotenspannungen ist. Die Wirkleistungsflüsse auf den Leitungen führen im Wesentlichen zu Unterschieden in den Phasenwinkeln der komplexen Knotenspannungen, während die Blindleistungsflüsse zu Unterschieden in deren Betrag führen. [6]

Um den komplexen Spannungsabfall zu berechnen, muss zunächst das Verhalten der Leitungen in der Niederspannungsebene näher betrachtet werden. Aufgrund der niedrigen Spannungen in der Niederspannungsebene ist die Kapazitätsbelag C’ von Erdkabeln von geringer Bedeutung. Zudem sind die Querreaktanzen der Kapazitäten bei Kabeln mit kurzen Längen in Niederspannungsnetzen im Vergleich zu den Lasten ausreichend groß. Die kapazitiven Ströme, also die Belastungsströme der Kabel, nehmen mit abnehmendem Spannungsniveau ab, sodass sie auf der Niederspannungsebene vernachlässigbar sind. Das bedeutet, dass der Kapazitätsbelag für Niederspannungserdkabel vernachlässigt werden kann. Daraus ergibt sich das Ersatzschaltbild für Niederspannungskabel, das in Abbildung 1 dargestellt ist und ein ohmsch-induktives Verhalten der Kabel zeigt. [7, 8]

Daher kann für die Niederspannungsebene gemäß Abbildung 1 eine Näherung für den komplexen Spannungsabfall eingeführt werden, wie in Gleichung (1) dargestellt, mit R = R’ \cdot l und X = \omega L’ \cdot l.

Der Spannungsabfall \Delta U kann dann in eine Längsspannung U\_l und eine Querspannung U\_q zerlegt werden, wie in Abbildung 2 dargestellt.

Für einen ohmsch-induktiven Laststrom werden die Längs- und Querspannungen gemäß Gleichung (2) berechnet. Bei einem ohmsch-kapazitiven Laststrom müssen die beiden Vorzeichen in Gleichung (2) entsprechend umgekehrt werden. Außerdem gilt für kleine Winkel \varphi näherungsweise die Beziehung in Gleichung (3), unter der Annahme U\_q \ll U und U\_q \ll U\_l.

Daraus ergibt sich die in Gleichung (4) dargestellte Beziehung, die das System der multiplen linearen Regression beschreibt.

### 3.3. Multiple lineare Regression

Nachdem die Berechnung der Eingangsdaten abgeschlossen und die Regressionsgleichung mit Gleichung (4) aufgestellt wurde, muss diese gelöst werden. Das multiple lineare Regressionsmodell wird mit der Methode der kleinsten Quadrate gelöst. Dabei wird die Summe der quadrierten Residuen gemäß Gleichung (5) minimiert, wobei i = 1, \dots, N die Anzahl der Messungen und k die Anzahl der zu bestimmenden Parameter \beta ist. Die Koeffizienten \beta werden so bestimmt, dass die Varianz um die Regressionsgerade minimiert wird.

## Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Leitungsparameterbestimmung für sechs verschiedene Niederspannungsnetze vorgestellt. Außerdem wird der Einfluss von Messunsicherheiten im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht.

### 4.1. Bestimmung der Leitungsparameter

Im Folgenden betrachten wir die Ergebnisse der Parameterbestimmung bei präziser Auflösung der Messwerte für unterschiedliche Versorgungsszenarien. Als Bewertungsgröße wird der absolute prozentuale Unterschied zwischen den bestimmten und den realen Leitungsparametern in Abhängigkeit vom Netzmodell betrachtet. Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die prozentualen Abweichungen der bestimmten Parameter R\_{est} und X\_{est} von den ursprünglichen Parametern R\_{orig} und X\_{orig}. Es ist erkennbar, dass das Modell die Leitungsparameter mit hoher Genauigkeit bestimmt und bei präzisen Daten zuverlässige Ergebnisse liefert. Für sowohl R als auch X liegen mindestens die Hälfte aller Schätzwerte über alle Netze und Szenarien hinweg nahe bei null Prozent Abweichung. Darüber hinaus haben alle Regressionsgleichungen einen Bestimmtheitsmaß von R^2 \approx 1, was bedeutet, dass ein linearer Zusammenhang zwischen den endogenen und den exogenen Variablen besteht.

Ein direkter Vergleich der beiden Parameter zeigt, dass X im Allgemeinen größeren Fehlern unterliegt als R. Dies liegt am Verhältnis X/R, das in den verwendeten Niederspannungsnetzen stets kleiner als eins ist. Dementsprechend ist R der dominantere Faktor und wird mit höherer Genauigkeit bestimmt.

Darüber hinaus zeigt ein genauerer Blick auf die Netzmodelle in den verschiedenen Szenarien, dass die Unsicherheit bei beiden Parametern mit jedem Szenario zunimmt. Besonders auffällig ist eine Veränderung in den Streubereichen, während die Mediane weitgehend konstant bleiben. Dieser Trend ist teilweise auf den Zuwachs von PV-Anlagen und Batteriespeichern zurückzuführen. Neben dem erhöhten bidirektionalen Leistungsfluss steigen die Wirkleistungsanteile der Leistungsflüsse deutlich an und die Blindleistungsanteile nehmen aufgrund der dezentralen Einspeisung ins Netz leicht zu, was zu einer Veränderung der Spannungsabfälle führt. Besonders in den Netzen, in denen die Anzahl der PV-Anlagen und Batteriespeicher deutlich zunimmt (z. B. in den Netzen 1 und 5 beim Wechsel von Szenario 0 zu 1), ist ein Anstieg der Streuweiten zu erkennen.

## 4.2. Einfluss von Messunsicherheiten

Sensitivitätsanalysen werden verwendet, um die Robustheit des entwickelten Verfahrens gegenüber Messunsicherheiten zu untersuchen. Dabei wird unter anderem die Anzahl der Nachkommastellen betrachtet. Abbildung 5 zeigt den Median der prozentualen Abweichung von R für alle sechs Netzmodelle in Abhängigkeit von der Anzahl der Nachkommastellen im Szenario 0. Es ist zu erkennen, dass die Parameterbestimmung ab einer Rundung auf drei Nachkommastellen deutlich bessere Ergebnisse liefert. Bei einer Rundung auf eine Nachkommastelle, die der Genauigkeit realer Messwerte von Smart Metern entspricht, sinkt die Qualität jedoch deutlich ab [9]. Dieses Verhalten ist auf die starke Veränderung der Spannungsabfälle zurückzuführen, die durch die Rundung der Knotenspannungsamplituden verursacht wird. Je nach Ähnlichkeit der Spannungsamplituden benachbarter Netzknoten treten teilweise sehr kleine Spannungsabfälle auf, sodass die Rundung dazu führt, dass diese Spannungsabfälle entweder deutlich größer oder kleiner als tatsächlich sind. Dies führt zu dem Schluss, dass geringe Spannungsabfälle ein kritischer Faktor für das Modell sind.

In der folgenden Analyse wird der Einfluss statistischer Messunsicherheiten auf die Qualität der Parameterbestimmung untersucht. Da der Einfluss realer Messtechnik abgebildet werden soll, werden zunächst die Eingangsdaten auf eine Nachkommastelle gerundet (gemäß [9]) und anschließend Messunsicherheiten zu den Zeitreihen hinzugefügt. Abbildung 6 zeigt die Qualität der Parameterbestimmung von R für die sechs Netzmodelle im Szenario 0 in Abhängigkeit von den hinzugefügten Messunsicherheiten. Es ist erkennbar, dass die Qualität mit zunehmenden Messunsicherheiten deutlich abnimmt, was den Erwartungen entspricht. Die Kurve lässt sich wiederum durch den Einfluss der Messunsicherheiten auf die Spannungsabfälle erklären. Aufgrund der Fehlerfortpflanzung addieren sich die maximalen absoluten Messunsicherheiten der Amplitudenwerte bei der Berechnung der Spannungsabfälle, sodass größere Messunsicherheiten als tatsächliche Spannungsabfälle entstehen.

Bei Betrachtung der Rekonstruktionsqualitäten einzelner Leitungen zeigt sich, dass die prozentuale Abweichung bei Leitungen mit hohem Spannungsabfall deutlich geringer ist. Es lässt sich somit beobachten, dass gerade die Kabel mit den höchsten Spannungsabfällen auch diejenigen sind, für die R und X am zuverlässigsten bestimmt werden können. Da insbesondere die Leitungen mit hohen Spannungsabfällen am ehesten zu Spannungsbandproblemen führen und deren Parameterbestimmung zufriedenstellende Ergebnisse zeigt, ist eine Umsetzung in der Praxis auch bei Messunsicherheiten möglich.

Die gleichen Muster und Aussagen gelten für die anderen zukünftigen Szenarien und für den Impedanzparameter X. Dabei sind die Ergebnisse aufgrund der leicht höheren Spannungsabfälle in Zukunft (infolge des Lastanstiegs in Szenario 1 und 2) leicht verbessert.

## Fazit

Diese Arbeit stellt eine Untersuchung zum Einfluss von Messunsicherheiten auf die Qualität der Bestimmung von Leitungsparametern mithilfe multipler linearer Regression auf Basis des Spannungsabfalls entlang von Leitungen vor.

Exemplarische Ergebnisse zeigen, dass die Leitungsparameter bei präzisen Amplitudenwerten der Zeitreihen von Knotenspannung, Knotenwirkleistung und Knotenblindleistung nahezu fehlerfrei bestimmt werden. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird gezeigt, dass die Rundung der Amplitudenwerte und die Hinzufügung von Messunsicherheiten – wie sie bei realen Messwerten von Smart-Metering-Systemen vorkommen – einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisqualität haben. Besonders geringe Spannungsabfälle werden durch die Rundung der Amplitudenwerte und die Hinzufügung von Messunsicherheiten stark verzerrt, während die Leitungsströme weitgehend unverändert bleiben. Im Vergleich dazu gibt es bei der Bestimmung der Parameter von Leitungen mit hohen Spannungsabfällen nur geringe Abweichungen zwischen den realen und geschätzten Parametern. Da gerade diese Leitungen tendenziell Spannungsbandprobleme verursachen, kann das Verfahren in diesen Fällen auch in der Praxis bei vorhandenen Messunsicherheiten angewendet werden.

Eine Vereinfachung dieser Arbeit ist die Beschränkung auf das einphasige Ersatzschaltbild. Da Stromnetze in der Regel dreiphasig ausgelegt sind, sollte eine Erweiterung der Simulationsmodelle und Methodik auf drei Phasen in Betracht gezogen werden. Aufgrund der höheren Informationsdichte in Dreiphasensystemen ist eine Verbesserung der Schätzungen zu erwarten. Außerdem werden Stromnetze zunehmend vermascht betrieben, sodass die Methodik und die Analysen auch auf vermaschte Netzstrukturen ausgeweitet werden sollten.