

# 1 Einleitung

Zukünftig wird in Deutschland eine nachhaltige elektrische Energieversorgung basierend auf regenerativen Energieträgern an Bedeutung gewinnen, unter anderem durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), den Emissionshandel und langfristig steigende Preise fossiler Energieträger. Der Anteil Erneuerbarer Energien (EE) am Bruttostromverbrauch in Deutschland soll nach den von der Bundesregierung im September 2010 und Juni 2011 getroffenen Beschlüssen im Rahmen des Energiekonzepts und der Energiewende bis zum Jahr 2020 auf 35 %, bis 2030 auf 50 %, bis 2040 auf 65 % und bis zum Jahr 2050 auf 80 % gesteigert werden. Damit erhöht sich der Einfluss der EE auf das Energieversorgungsnetz und dessen Netzqualität erheblich. Die in Photovoltaik- (PV) und Windenergieanlagen (WEA) enthaltenen Umrichter verwenden leistungselektronische Bauelemente, welche Oberschwingungsbehaftete Ströme in das Netz einspeisen. Resultierende Oberschwingungsspannungen verringern die Netzqualität und sind nur bis zu bestimmten Grenzwerten ([BDEW08], [EN50160]) zulässig. Die absoluten Höhen dieser Oberschwingungsspannungen und von Spannungsschwankungen, Flickern etc. sind von der frequenzabhängigen Netzimpedanz abhängig. Die genaue Kenntnis der Netzimpedanz ist von großem Interesse, da sie eine Aussage über die entstehenden Netzzrückwirkungen erlaubt, mit der entsprechende Anpassungen vorgenommen werden können [Lan09a].

Der geplante Leistungsanstieg von WEA wird sowohl auf der Mittelspannungsebene (im Rahmen von Repowering) als auch bei größeren Windparks auf der Hochspannungsebene stattfinden. Leistungsstarke Offshore-Windparks werden vermutlich an die Höchstspannungsebene bzw. ein geplantes HGÜ-Overlay-Netz (Hochspannungsgleichstromübertragung) angeschlossen. Hierbei werden die auf höheren Spannungsebenen vorhandenen Unregelmäßigkeiten in Form von Spannungsüberschwingungen auf die unterlagerten Spannungsebenen übertragen.

Auf der Niederspannungsebene wird die Netzqualität durch den steigenden Einsatz leistungselektronischer Bauelemente bspw. durch den erheblichen Anstieg der weit verbreiteten Photovoltaikanlagen, den vermutlichen Anstieg der Elektromobilität sowie allgemein deren vermehrtem Einsatz in einer Vielzahl von Geräten (u.a. auch durch das Glühlampenverbot) herabgesetzt.

Die Netzimpedanz setzt sich aus den vorhandenen Betriebsmitteln in einem Netz zusammen. Mit der Kenntnis der vorhandenen Kabel-, Transformator-, Freileitungsdaten etc. lässt sich die Netzimpedanz bis zu einem gewissen Genauigkeits-

grad ermitteln. Die Impedanzen dieser Betriebsmittel werden meist messtechnisch bestimmt und in Datenblättern festgehalten. Diese Messungen beschränken sich allerdings auf definierte Zustände. Es sind oft keine frequenzabhängigen Messungen vorhanden. Die äußeren Einflüsse wie Temperatur, Luftdruck und -feuchtigkeit etc. sind nicht berücksichtigt. Zusätzlich sind bei später im Feld vorhandenen Betriebsmitteln Fertigungstoleranzen zu den Datenblättern unvermeidbar. Es treten Alterungserscheinungen der Betriebsmittel (Korrosion, Veränderung der Isolierstoffe in Kabeln und Transformatoren) auf. Außerdem spielt die Aufstellung bzw. Verlegung dieser Betriebsmittel eine entscheidende Rolle. Die Erdkapazitäten von Kabeln werden von Verlegungstiefe und vorhandenem Erdreich beeinflusst, ebenso sind bei Freileitungen die Betriebs- und Erdkapazitäten von den örtlichen Rahmenbedingungen abhängig.

Es ist nicht möglich, alle zuvor beschriebenen Einflüsse im Rahmen einer Modellierung zu berücksichtigen. Eine exakte Modellierung von Betriebsmitteln und Lasten sowie von deren Frequenzverläufen für eine Harmonischenanalyse ist sehr aufwändig und meist aufgrund fehlender Daten nicht realisierbar. Die Einflüsse der äußeren Rahmenbedingungen auf die Frequenzverläufe können in ihrer Wirkung nur abgeschätzt werden, wobei diese Abschätzung der Netzimpedanz unter Berücksichtigung einzelner Betriebsmittel des Netzes mittels Tabellenwerten meist auf die Netzfrequenz von 50 Hz beschränkt ist. Es wird daher mit stark vereinfachten Netzmodellen gerechnet. Dieses führt im ungünstigsten Fall zu einer falschen Interpretation der frequenzabhängigen Netzimpedanz.

In Bezug auf die Netzintegration von WEA und PV-Anlagen können zwei wesentliche Problemstellungen identifiziert werden, die zur einer irrtümlichen Limitierung der anschließbaren Leistung führen können. Zum einen die Einhaltung von Grenzwerten für Oberschwingungsspannungen im Falle von Resonanzstellen. Die Bewertung der Oberschwingungsemission nach den in entsprechenden Normen vorgeschriebenen Verfahren schätzt diese zur sicheren Seite ab. Hierbei wird meist ein ideales ohmsch-induktives Netzmodell angesetzt. Mögliche Resonanzen, bei denen die reale Netzimpedanz diese Werte um ein Vielfaches übersteigen kann, werden nicht berücksichtigt. Zum anderen die ungenaue Kenntnis der vollen Anschlusskapazität eines Netzverknüpfungspunktes (NVP) bei der Netzintegration von EE, so dass dessen mögliches Potential nicht voll ausgeschöpft wird.

## 1.1 Motivation

Der genaue Frequenzverlauf der Netzimpedanz unter Berücksichtigung aller Netzelemente und der aktuellen Lastsituation kann nur durch eine Messung am betroffenen NVP bestimmt werden. Der Frequenzverlauf ist entscheidend, um mögliche Resonanzstellen der Netzimpedanz zu detektieren und die einzelnen Harmonischen von Strömen und Spannungen zu bewerten. Stimmt die Frequenz einer Resonanz-

stelle mit der Frequenz einer eingespeisten Stromharmonischen einer Erzeugungsanlage überein, entstehen hohe Überspannungen. Diese dürfen die in Normen festgelegten Grenzwerte nicht überschreiten, andernfalls könnten die Isolierung von Betriebsmitteln gefährdet werden, Netzverluste stark ansteigen und der Betrieb von Verbrauchern negativ beeinflusst werden. Dann werden zusätzliche Filteranlagen zur Unterdrückung notwendig. Die Dimensionierung dieser Filteranlagen bzw. die Anpassung bereits bestehender Filteranlagen kann mit dem gemessenen Frequenzverlauf der Netzimpedanz effizienter als nur anhand theoretischer Werte erfolgen. Ein weiterer Aspekt betrifft die Ausbreitung von harmonischen Strömen, die mit der Kenntnis der frequenzabhängigen Netzimpedanz genauer berechnet werden kann. Bei Erzeugungsanlagen, die aus mehreren sogenannten Erzeugungseinheiten bestehen können, werden für die harmonischen Ströme der einzelnen Einheiten bestimmte Additionstheoreme verwendet, um die harmonischen Stromwerte der Erzeugungsanlage zu bestimmen. Es werden meist nur gemessene Effektivwerte verwendet und insgesamt eine Abschätzung nach oben vorgenommen, so dass die mit diesen Additionstheoremen berechneten Werte nicht mit gemessenen Werten übereinstimmen. Mit den Messwerten der frequenzabhängigen Netzimpedanzen können die zulässigen Werte der harmonischen Ströme der einzelnen Erzeugungseinheiten sowie deren Ausbreitung und Überlagerung wesentlich besser bestimmt werden. Ferner können die ohmsche und induktive Komponente der Netzimpedanz direkt zur Abschätzung der maximalen Kurzschlussströme und der auftretenden Netzverluste herangezogen werden. Es ist mit diesen beiden Komponenten zudem eine Berechnung von Spannungsanhebungen bzw. -absenkungen aufgrund von eingespeisten bzw. abgenommenen Wirk- und Blindleistungen von Erzeugungs- bzw. Verbraucheranlagen möglich.

Aus den aufgezeigten Punkten lässt sich mit der Kenntnis der frequenzabhängigen Netzimpedanz eine verbesserte Netzintegration von Erneuerbaren Energieanlagen (EEA) mit leistungselektronischer Netzkopplung ableiten. Die 50-Hz-Komponente der Netzimpedanz kann zur Bewertung der resultierenden Spannungsanhebung und somit der Anschlusskapazität verwendet werden. Der übrige Frequenzverlauf ist entscheidend zur Bewertung des Einflusses von Harmonischen. Die Netzimpedanz spielt außerdem bei der Regelung und besonders im Fehlerfall von WEA sowie bei deren Zertifizierung eine wichtige Rolle. Vielfach wird angenommen, dass die gemessenen harmonischen Ströme der Anlagen von einem NVP auf andere NVP übertragen werden können. Die Oberschwingungsemissionen von WEA werden oft mit ungesteuerten Stromquellen nachgebildet und deren Verhalten auf andere NVP übertragen, da die Netzimpedanz bisher nicht als objektiv gemessene Größe zur Verfügung stand. So werden bei der Zertifizierung die gemessenen harmonischen Ströme mit den in gültigen Normen angegebenen Oberwerten für die harmonischen Ströme verglichen und im Datenblatt einer Erzeugungsanlage festgehalten. In den Einheitszertifikaten der WEA sind meist nur die Effektivwerte der Harmonischen und nicht dreiphasige komplexe Stromwerte angegeben. Diese

harmonischen Ströme können allerdings nicht direkt auf andere NVP übertragen werden. Dadurch wird die Aussagekraft von Harmonischenanalysen vermindert. Vielmehr muss die Netzimpedanz sowohl bei der Zertifizierung als auch beim späteren Anschluss vermessen werden, um exakte Aussagen zu treffen, andernfalls sind nur Abschätzungen möglich.

Die genannten Lücken sollen mit dieser Arbeit geschlossen werden. Die exakte Vermessung der frequenzabhängigen Netzimpedanz eines NVP bereits vor dem Netzanschluss der entsprechenden Anlagen ermöglicht es, evtl. auftretende Probleme frühzeitig zu identifizieren und auf Grundlage der Messungen die erforderlichen Anpassungen vorzunehmen. Der entwickelte Messcontainer zur Bestimmung der zeit- und frequenzabhängigen Netzimpedanz auf der Mittelspannungsebene kann bei einem aktivem Netz die im Messzeitraum auftretenden zeitlichen Schwankungen aufgrund von Schaltvorgängen und sich ändernden Lastzuständen erfassen und ein objektives Messergebnis generieren. Im Gegensatz zur bisherigen Bewertung des Einflusses auf die Spannungsüberschwingungen erscheint vielmehr eine Modellierung der EEA als Spannungsquelle mit dem dazugehörigen Ersatzschaltbild der Anlage mit dem eingesetzten Umrichter unter Berücksichtigung von dessen Pulsmuster sowie des netzseitigen Filters sinnvoll. Die Ströme können in Abhängigkeit von den Netzimpedanzen und der vorhandenen Harmonischen-Vorbelastung am NVP ermittelt werden. Der Einfluss einer EEA auf das Netz lässt sich mit dem gewonnenen Messergebnis der Netzimpedanz besser von der bestehenden Netzvorbelastung trennen. Die Emission von Oberschwingungen sowie deren Übertragbarkeit auf andere NVP kann besser bewertet werden. Somit kann auch die Zertifizierung von EEA in Bezug auf Harmonische und Flicker objektiviert werden.

## 1.2 Struktur und Methodik der Arbeit

Diese Arbeit ist im Rahmen eines Forschungsprojekts entstanden, in dem ein neuartiger mobiler Messcontainer entwickelt wurde, welcher die Bestimmung der zeit- und frequenzabhängigen Netzimpedanz auf der Mittelspannungsebene bis zu einer Spannung von 20 kV mit einem neuen Messverfahren erlaubt. In [Dot14] wurde ein Messverfahren zur Bestimmung der Netzimpedanzen in Dreileitersystemen entwickelt (s. Abschnitt 2.6) sowie die im Messcontainer eingesetzte Leistungselektronik beschrieben. In einer zukünftigen Arbeit wird auf die systemtheoretische Betrachtung des Messverfahrens, woraus optimierte Pulsmuster zur Ansteuerung der Leistungselektronik abgeleitet werden, die Analyse von möglichen Fehlerquellen bei der Netzimpedanzbestimmung sowie die Entwicklung eines optimierten Mess- und Ansteuerungssystems eingegangen, s. [Jor10], [Jor13].

In Bild 1.1 ist schematisch der Aufbau dieser Arbeit mit ihren wesentlichen Punk-

ten und Verknüpfungen dargestellt. In Kapitel 2 wird zunächst der relevante Stand der Technik für diese Arbeit vorgestellt. Die Bedeutung der Netzimpedanz, Netzurückwirkungen und relevante Normen werden zusammengefasst. Es wird auf den Frequenzverlauf der Netzimpedanz und ihren Zusammenhang mit Erneuerbaren Energieanlagen eingegangen.

Kapitel 3 enthält zum einen das erweiterte Messverfahren zur Bestimmung der Netzimpedanzen der Außenleiter und der Neutralleiterimpedanz, die im Niederspannungsnetz eine wichtige Rolle spielt. Dazu werden unterschiedliche Verschaltungen realisiert, um die Netzimpedanzen geeignet anzuregen. Basierend auf einer Netzanregung durch definierte Schaltvorgänge einer einzelnen ohmschen Last können aus den gleichzeitig gemessenen Strom- und Spannungsverläufen die Netzimpedanzen im Frequenzbereich berechnet werden. Zum anderen wird ein optimiertes Messverfahren entwickelt, das eine starke Reduzierung der Rauschanteile bei den gemessenen Strömen und Spannungen und damit die bestmögliche Bestimmung der Netzimpedanzen erlaubt. Die Genauigkeit dieses Verfahrens wird anhand von Simulationen an vier Mittelspannungsnetzen eingehend untersucht. Es wird der Einfluss von Asymmetrien im Netzaufbau auf die Netzimpedanzbestimmung untersucht. Die unterschiedlichen Sternpunktbehandlungen werden vorgestellt und eine Impedanzmatrix für Mittelspannungsnetze mit isoliert oder kompensiert betriebenen Sternpunkten aufgestellt. Des Weiteren wird der Einfluss von Koppelimpedanzen und Eingangskopplungsimpedanzen untersucht. Insbesondere die Analyse kapazitiver Kopplungen wird theoretisch aufbereitet und im Messverfahren mit berücksichtigt.

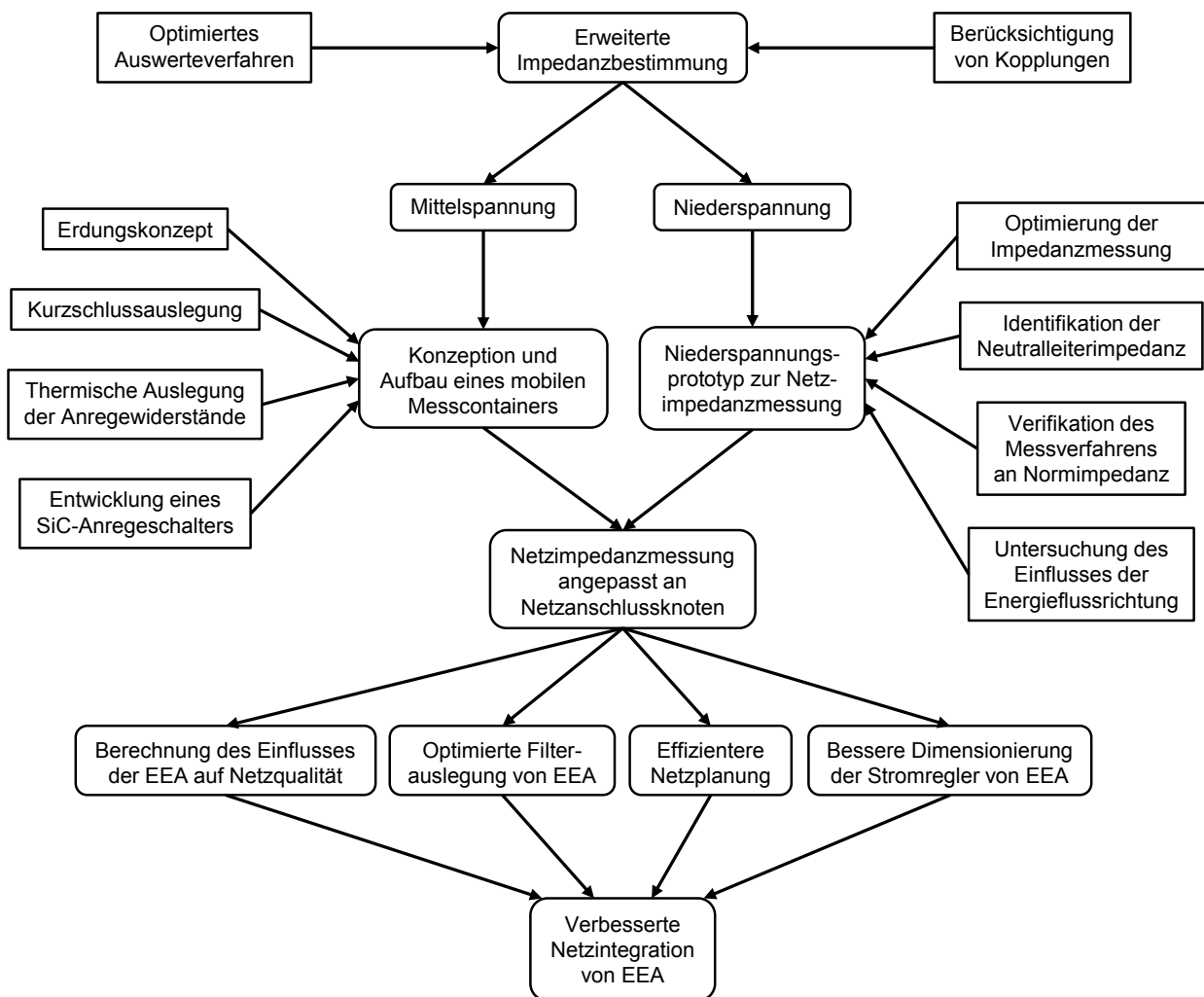


Bild 1.1: Schematischer Aufbau der Arbeit

Um eine flexible Netzanregung bei unterschiedlichen Netzanschlussknoten zu erzielen, wird in Kapitel 4 der Einfluss der Schaltflanken der eingesetzten Leistungselektronik auf die Stromspektren bei der Netzimpedanzmessung untersucht. Die Realisierung der Leistungselektronik stellt insbesondere für die Mittelspannungsebene eine große Herausforderung dar. Es wird ein neuartiger Anregeschalter basierend auf Siliziumcarbid-Sperrschicht-Feldeffekttransistoren (SiC-JFETs) aufgebaut und umfangreich getestet. Er besteht aus einer Reihenschaltung von mehreren Bauelementen, um den hohen Spannungen widerstehen zu können. Über zwei einstellbare Widerstände lassen sich die Ein- und Ausschaltflanken dieses Anregeschalters innerhalb gewisser Grenzen an die Netzgegebenheiten anpassen. Des Weiteren werden in Kapitel 4 zwei unterschiedliche Lastwiderstände für die Mittelspannungsebene dimensioniert und hinsichtlich ihres thermischen Verhaltens bei der Netzanregung untersucht. Mit den Lastwiderständen können über veränderliche Verschaltungen unterschiedliche Anregeströme erzielt werden, so dass diese zur flexiblen Netzanregung beitragen.

In Kapitel 5 wird die Entwicklung des Messcontainers zur Bestimmung der Netzimpedanzen auf der 10-kV oder 20-kV-Mittelspannungsebene detailliert beschrie-

ben. Dabei wird auf die thermische und mechanische Auslegung des Messcontainers eingegangen und seine Kurzschlussfestigkeit im Rahmen des Schutzkonzeptes untersucht. Die möglichen Fehlerströme werden berechnet, aus denen die Spannungsauslegung sowie das Erdungskonzept abgeleitet werden. Es wird auf die Messtechnik sowie die Klimaanlage und Spannungsversorgung eingegangen.

Kapitel 6 präsentiert Messungen der Netzimpedanzen im Nieder- und Mittelspannungsnetz. Das entwickelte Messverfahren aus Kapitel 3 sowie das Auswertverfahren werden zunächst an einer Normimpedanz verifiziert. Es werden Messergebnisse auf der Niederspannungsebene zum Einfluss der Energieflussrichtung vorgestellt. Die vorgestellten Messergebnisse auf der Mittelspannungsebene wurden mit dem neuen Netzimpedanzmesscontainer an einem 10-kV-Anschluss auf dem Gelände der Helmut-Schmidt-Universität aufgenommen.

Die Analyse der Zusammenhänge der Netzimpedanz mit der Netzintegration Erneuerbarer Energien innerhalb von Kapitel 7 fokussiert sich auf WEA. Der Aufbau von modernen WEA wird beschrieben und deren Oberschwingungsemissionen und Flickerbewertung eingehend untersucht. Die Auslegung von netzseitigen Filteranlagen wird beschrieben und die Rolle der Netzimpedanz in diesem Zusammenhang analysiert. Des Weiteren werden die Bedeutung der eingesetzten Stromregler sowie deren Stabilität an unterschiedlichen Netzanschlusspunkten verglichen. Anschließend werden die Bewertung der Emission von Stromharmonischen nach jetzigem Stand vorgestellt und verschiedene Theorien zu deren Ausbreitung im Netz hierzu verglichen. Die durch die Messung der Netzimpedanz ermöglichten Vorteile für die Beurteilung des Netzanschlusses von EEA werden beschrieben. Aus den genannten Punkten wird ein Konzept für eine verbesserte Netzintegration Erneuerbarer Energieanlagen herausgearbeitet. Am Ende dieses Kapitels werden weitere Optimierungspotentiale aufgezeigt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in Kapitel 8 zusammengefasst. Abschließend werden weitere bereits laufende Forschungsprojekte kurz vorgestellt, in denen Netzimpedanzmessungen durchgeführt und der Einfluss der Netzimpedanz weiter untersucht werden soll, sowie weitere Ausblicke auf weiterführende Forschungsaspekte gegeben.