Raimund Schnieder (Autor)

Regelungsverfahren für regelbare Ortsnetztransformatoren im Mono- und Multisensorbetrieb

https://cuvillier.de/de/shop/publications/7728

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

1 Einleitung und Motivation

Mit der anhaltenden Energiewende in Deutschland ergibt sich ein Wandel von einer zentralen elektrischen Energiebereitstellung zu einer vermehrt dezentralen und regenerativen Energiebereitstellung. Dieser Wandel basiert auf politischen Entscheidungen [1], wie u.a. den Ausstieg aus der zentralen nuklearen Energiewandlung (Atomkraftwerke) und den Ausbau der erneuerbaren Energien, vorangetrieben durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) [2] [3]. Die Transformationsziele hinsichtlich der elektrischen Energiebereitstellung sind im §1 des EEG 2014 [3] (Zweck und Ziel des Gesetzes) klar definiert:

„(1) Zweck dieses Gesetzes ist es, insbesondere im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen, die volkswirtschaftlichen Kosten der Energieversorgung auch durch die Einbeziehung langfristiger externer Effekte zu verringern, fossile Energieressourcen zu schonen und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien zu fördern.
(2) Um den Zweck des Absatzes 1 zu erreichen, verfolgt dieses Gesetz das Ziel, den Anteil des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms am Bruttostromverbrauch stetig und kosteneffizient auf mindestens 80 Prozent bis zum Jahr 2050 zu erhöhen. Hierzu soll dieser Anteil betragen:

1. 40 bis 45 Prozent bis zum Jahr 2025 und
2. 55 bis 60 Prozent bis zum Jahr 2035

(3) Das Ziel nach Absatz 2 Satz 2 Nummer 1 dient auch dazu, den Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Bruttoendenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 auf mindestens 18 Prozent zu erhöhen.“ [3]

Während die konventionellen Großkraftwerke in den höheren Spannungsebenen (Hoch- und Höchstspannung) eingebunden sind, wurde bisher ein Großteil der erneuerbaren Energieanlagen in der unteren Verteilnetzebene (Mittel- und Niederspannung) integriert, wie Abbildung 1-1 zu entnehmen ist. Auch bei zukünftig hinzukommenden dezentralen Anlagen ist davon auszugehen, dass diese aufgrund der geringeren Nennleistung ebenfalls in den unteren Netzebenen integriert werden. Ein weiterer Wandel ergibt sich in der angestrebten Elektrifizierung des Mobilitätssektors, aus dem ebenfalls eine Rückwirkung auf die elektrischen Verteilnetze resultiert. Das Ziel der Bundesregierung ist eine Durchdringung von insgesamt einer Millionen Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 zu erreichen. [4] [5] Hiermit verbunden ist die Integration entsprechender Ladepunkte im Haushaltsbereich, aber auch im öffentlichen Bereich (u.a. Parkhäuser, Park-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

plätze). Hierdurch verändert sich auch das Lastverhalten in den Niederspannungsverteilnetzen und die Netze sind an diese Veränderung anzupassen.

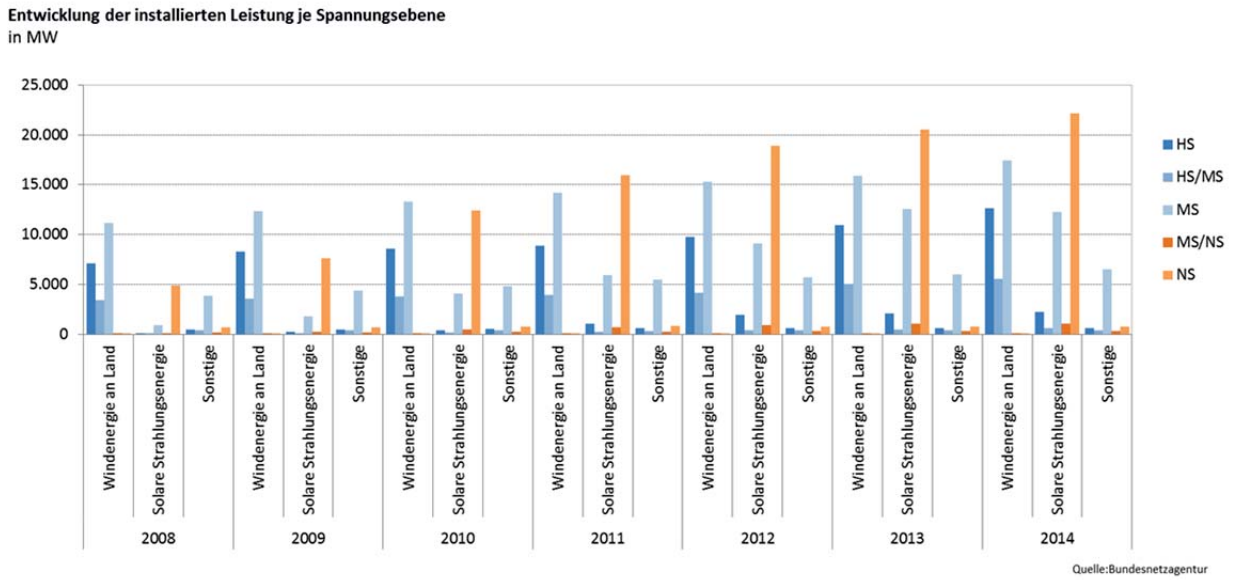

Abbildung 1-1: Entwicklung der installierten Leistung unterteilt nach Spannungsebene [6]

Die unteren Netzebenen waren ursprünglich nur für die Versorgung der Verbraucher ausgelegt. Nun sind durch den Zubau erneuerbarer Energieanlagen in diesen Spannungsebenen Maßnahmen zur Gewährleistung eines stabilen Netzbetriebs zu ergreifen, um einerseits die dezentrale Erzeugungskapazität, andererseits aber auch zusätzliche Lasten, wie die Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität oder auch elektrische Heizsysteme (Wärmepumpen überwiegend im Neubaubereich), aufnehmen zu können.

In den höheren Spannungsebenen ist meist aufgrund der Stromtragfähigkeit (thermische Belastungsgrenzen) der Netzbetriebsmittel ein Netzausbau oder eine Netzoptimierung notwendig. In der Mittel- und Niederspannungsebene erfolgt hauptsächlich ein Netzausbau aufgrund möglicher Verletzungen der zulässigen Spannungstoleranzen nach DIN EN 50160 [7]. Eine mögliche Lösung zur Behebung des beschriebenen Problems ist der konventionelle Netzausbau. Hierbei werden die Leiterquerschnitte vergrößert oder leistungsstärkere Transformatoren verbaut, um die Netzimpedanz zu reduzieren und folglich die Kurzschlussleistung zu erhöhen. Dadurch wird das Netz robust gegenüber Spannungsänderungen. Hiermit verbunden sind Baumaßnahmen in öffentlichen Bereichen, die entsprechende Behinderungen mit sich führen. Daher sind alternative nachhaltige Lösungsansätze zu verfolgen, die diese erforderlichen Baumaßnahmen und die damit verbundenen Kosten reduzieren.

In den vergangenen Jahren wurden zur Spannungsregelung in Niederspannungsverteilnetzen unterschiedliche Ansätze entwickelt und erprobt, deren Wirkung und Ein-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

satzgebiet in dieser Arbeit kurz vorgestellt werden. Durch den politisch vorangetriebenen Transformationsprozess ist es notwendig die unteren, bisher passiven Netzebenen, vermehrt mit geeigneten Aktoren und zugehöriger Sensorik auszustatten um eine dynamische Regelung mit dem Ziel eines stabilen Netzbetriebs zu gewährleisten. Hierbei ist der erforderliche Aufwand an Informations- und Kommunikationsinfrastruktur auf ein Minimum zu begrenzen.

Bisher fand die Netzbetriebsführung ausschließlich in den höheren Spannungsebenen statt, da die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) für die Einhaltung der Systemdienstleistungen (u.a. Frequenzhaltung, Spannungshaltung und Versorgungswiederaufbau) verantwortlich sind. Durch die beschriebene Transformation des elektrischen Energiesystems und der sich hieraus ergebenden Spannungsfluktuationen durch entsprechende Gradienten und unterschiedliche Vorzeichen (Last / Einspeisung) im Leistungsfluss gewinnt eine aktive dynamische Spannungsregelung in den unteren Netzebenen zunehmend an Bedeutung.

Als möglicher zentraler Aktor zur Spannungsregelung in den Niederspannungsverteilnetzen wird der regelbare Ortsnetztransformator (rONT) in dieser Arbeit detailliert betrachtet, der durch eine unterbrechungsfreie Änderung des Transformatorenübersetzungsverhältnisses die Unterspannung bedarfsgerecht einstellen kann. Endkunden bleiben bei dieser spannungsregelnden Möglichkeit von Unannehmlichkeiten verschont, da sich Ortsnetztransformator und zugehörige Sensorik im Eigentum des zuständigen Verteilnetzbetreibers befinden und auf Kundenanlagen nicht zugegriffen werden muss.

Innerhalb der erforderlichen Untersuchungen werden die bekannten Betriebsarten regelbarer Ortsnetztransformatoren und deren Wirkungen ausschließlich auf die Niederspannungsnetzebene analysiert und vorgestellt (punktueller rONT-Einsatz) sowie auch Erweiterungen der Regelungsverfahren eingeführt und untersucht. Abschließend erfolgt ein Vergleich hinsichtlich der spannungsregelnden Wirkung auf das Niederspannungsverteilnetz und die gewonnenen Erkenntnisse werden an einer realen Niederspannungsnetzstruktur verifiziert.

Die Wirkung eines (flächendeckenden) Einsatzes regelbarer Ortsnetztransformatoren auf die vorgelagerte Mittelspannungsebene wurde bereits in einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit [8] [9] analysiert und die resultierenden Ergebnisse nehmen direkten Einfluss in diese Arbeit.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

1.1 Aufgabenstellung

Regelbare Ortsnetztransformatoren (rONT) werden zum jetzigen Zeitpunkt hauptsächlich im Monosensorbetrieb eingesetzt. Hierbei wird der Spannungsistwert direkt an der Transformatorenunterspannungsseite über die drei Phasen (*L1*, *L2*, *L3*) gemessen und gemittelt an den Spannungsregler als Eingangsgröße übergeben. Durch diese Betriebsart kann die Mittelspannungsfluktuation ausgeregelt werden, sodass sich für das Niederspannungsnetz weitere Freiheiten im nach Norm [7] zulässigen Spannungsband ergeben und spannungsbandbedingter Netzausbau vermieden bzw. reduziert werden kann. Ebenfalls ist es möglich den Monosensorbetrieb mit einer abgesetzten Spannungsistwerterfassung, beispielsweise an einem kritischen Netzausläufer, zu realisieren. Beim Monosensorbetrieb mit abgesetzter Spannungsistwerterfassung ist allerdings eine genaue Kenntnis der Gegebenheiten im Niederspannungsverteilnetz Voraussetzung, um einen geeigneten Messpunkt zur Abbildung des gesamten Spannungszustandes im Netz zu identifizieren. Hinzu kommt entsprechender Kommunikationsaufwand zur Messdatenübertragung an den Regler in Ortsnetzstation.

Eine weitere Betriebsart ist der Multisensorbetrieb. Bei dieser werden dem Regelalgorithmus zusätzlich abgesetzte Spannungsmesswerte aus dem Niederspannungsnetz zur Verfügung gestellt. Damit wird der Spannungszustand im Netz detaillierter abgebildet und durch entsprechende Änderungen des Übersetzungsverhältnisses darauf reagiert. Aufgrund des Zusatzaufwandes an Informations- und Kommunikationsinfrastruktur (IKT) wird dieses Regelkonzept bisher nicht in der Praxis eingesetzt. Hieraus resultiert die Aufgabe, einen geeigneten Regelalgorithmus für den Multisensorbetrieb zu entwickeln und diesen durch dynamische Netzberechnungen zu erproben.

Durch Zusatzinformationen (u.a. richtungsabhängiger Leistungsfluss, Solarstrahlungsleistung) ist es möglich, den Standard-Regler (Stand der Technik) des bekannten Monosensorbetriebs mit dem Ziel der Erzeugung weiterer netzplanerischer Freiheiten im Spannungsband entsprechend zu erweitern. Demzufolge ergibt sich eine weitere Aufgabe für diese Arbeit. Es sollen entsprechende Statiken und Algorithmen entwickelt werden, um einen Wirkungsvergleich der unterschiedlichen Spannungsregelkonzepte auf das Niederspannungsverteilnetz durchzuführen. Hierzu sind die beteiligten Komponenten (regelbarer Ortsnetztransformator, Niederspannungsnetzstruktur, Lasten und Erzeuger) in entsprechende Modelle zu überführen. Die verschiedenen Regelungskonzepte für ein solches System sollen mit Hilfe von Simulationen getestet und geeignete Kennzahlen für die Regelgüte ermittelt werden. Anschließend erfolgt durch eine Verifizierung der gewonnenen Erkenntnisse an einer vollständigen Niederspannungsnetzstruktur anhand identifizierter Kennzahlen für den Praxiseinsatz.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Das Ziel der Arbeit ist es ein geeignetes Regelungskonzept für den regelbaren Ortsnetztransformator zur Spannungsregelung im Niederspannungsverteilnetz bei minimaler Messinfrastruktur zu ermitteln. Darüber hinaus sollen die vorgeschlagenen Lösungen auf den bisher in der Praxis eingesetzten Regelalgorithmus des Monosensorbetriebs ausgedehnt werden, sodass eine Erweiterung der installierten regelbaren Ortsnetztransformatoren mit geringem Aufwand möglich ist. Unabhängig vom Regelungskonzept gelten als Stellsignal die erforderliche Stufenpositionen SISO – Single Input – Single Output für den Monosensorbetrieb bzw. MISO – Multiple Input und Single Output für den Multisensorbetrieb.

Auf Basis der theoretischen Untersuchungen werden Handlungsmöglichkeiten für den Praxiseinsatz empfohlen und das theoretische Zubaupotential ermittelt. Zur Vergleichbarkeit der in der Arbeit erzeugten Untersuchungsergebnisse und des praxisnahen Stufverhalten regelbarer Ortsnetztransformatoren werden Messdaten [10] aus zwei realen Niederspannungsnetzen herangezogen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

1.2 Vorgehensweise bei den theoretischen Untersuchungen zum regelbaren Ortsnetztransformator

Die notwendigen Untersuchungen werden überwiegend mit dynamischen Simulationen und Berechnungen durchgeführt, da ein geeigneter Demonstrator in einer Laborumgebung aktuell nicht zur Verfügung steht.

Abbildung 1-2 zeigt die Vorgehensweise bei den Untersuchungen, in der sich auch die Gliederung dieser Arbeit widerspiegelt.

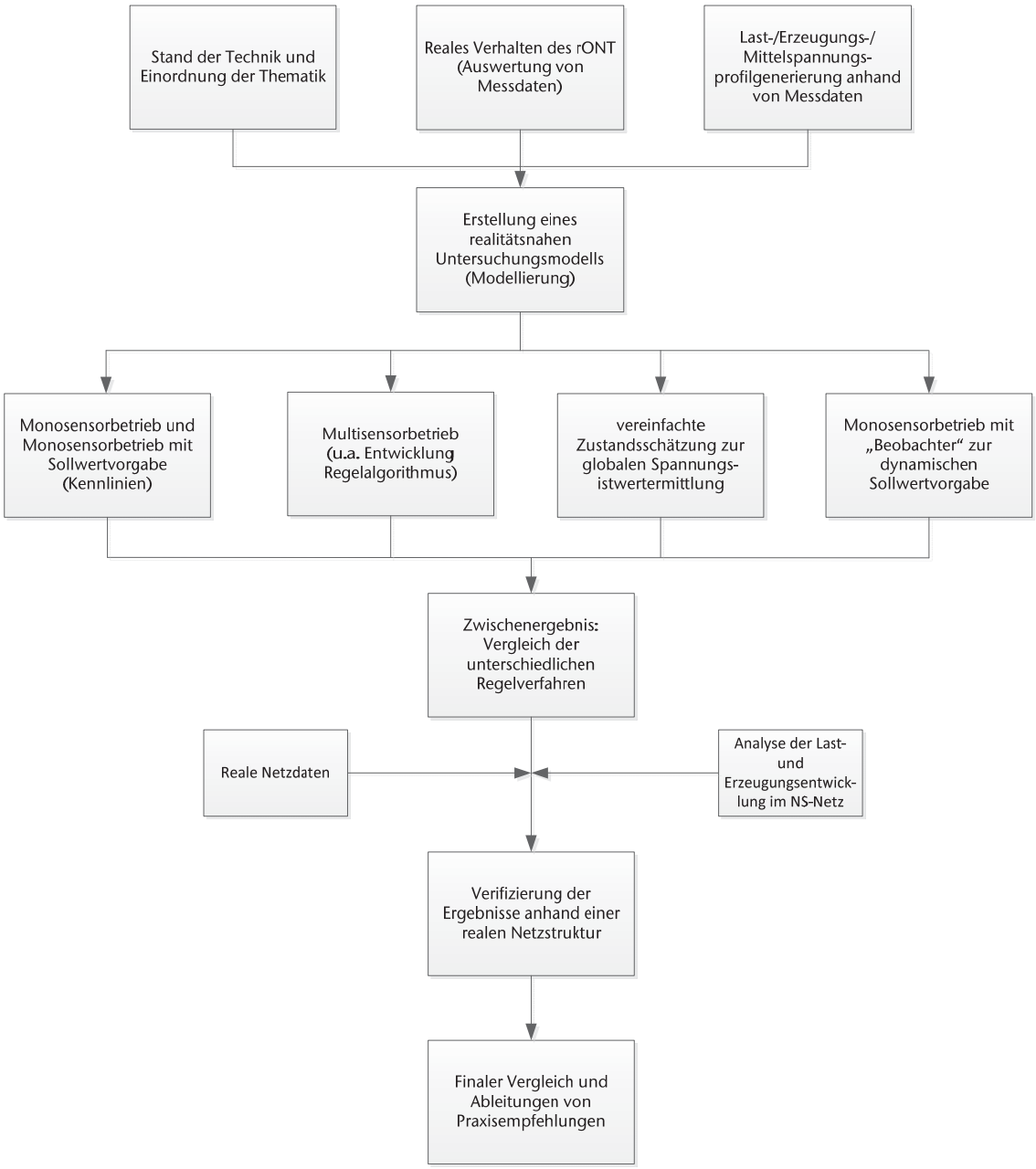

Abbildung 1-2: Methodisches Vorgehen zur Ergebnisgewinnung bei den Untersuchungen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Überführung der Ergebnisse in die reale Welt wird an geeigneten Schnittstellen hergestellt, sodass reale Netzdaten, Leistungszeitreihen von Lasten und Erzeugern sowie das reale Stufverhalten eines regelbaren Ortsnetztransformators in den Untersuchungen berücksichtigt werden können.

1.3 Grundlagen und Stand der Technik

Zur Einführung in die Thematik wird in den folgenden Teilkapiteln ein Überblick über den Aufbau der elektrischen Energieversorgung in Deutschland gegeben. Das Hauptaugenmerk wird hierbei auf die Netzstrukturen und Gegebenheiten im Bereich der Niederspannungsverteilnetzebene (Netzebene 7, Abbildung 1-3; $U_{n,LL} = 0{,}4$ kV, bzw. $U_{n,LN} = 0{,}23$ kV) gelegt, in denen regelbare Ortsnetztransformatoren (Netzebene 6) zur Spannungsregelung eingesetzt werden können. [9], [11], [12]

1.3.1 Aufbau des elektrischen Energiesystems in Deutschland

Das elektrische Energieversorgungssystem in Deutschland ist als Drehstrom-/Drehspannungssystem ausgelegt und in sieben Netzebenen (Abbildung 1-3) unterteilt. An diese sind die unterschiedlichsten Lasten und Erzeugereinheiten in Abhängigkeit ihrer Bemessungsleistung angeschlossen. Das Verbundnetz (Höchstspannung) dient als Transportnetz und verbindet die dem ENTSO-E angehörigen Länder [13] miteinander. Die darunter folgenden Netzebenen (Hochspannung, Mittelspannung, Niederspannung) werden als Verteilnetze bezeichnet, über welche die elektrische Energie zu den Lasten hin verteilt bzw. in heutiger Zeit auch die bereitgestellte elektrische Energie der dezentralen überwiegend regenerativen Energiewandlungseinheiten aufgenommen wird. Gekoppelt sind die einzelnen Netzebenen über Drehstromtransformatoren, die in den oberen Netzebenen (HöS/HS und HS/MS) mit Laststufenschaltern ausgestattet sind. Diese dienen der Änderung des Übersetzungsverhältnisses unter Last zur Spannungsregelung auf der Unterspannungsseite bzw. bei starr gekoppelten Netzen auch zur Regelung des Blindleistungsflusses. [14]

Verteilnetztransformatoren (Umspannung MS/NS) waren in der Vergangenheit nur mit Umstellern (NLTC) ausgestattet, mit denen vor Inbetriebnahme des Transformators die Übersetzung im freigeschalteten Zustand eingestellt werden kann. Aufgrund der ursprünglichen Lastdominierung der Niederspannungsverteilnetze konnte auf diese Weise an der Niederspannungsverteilung (Transformatorenunterspannungsseite) die Spannung höher als die Nennspannung eingestellt werden. Dies diente der Kompensation des Spannungsabfalls über den Impedanzen der Niederspannungsleitungen um die Netzspannung im zulässigen Spannungstoleranzband nach [7] zu halten. Die Um-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

steller sind ausschließlich spannungsfrei zu betätigen und können daher nicht zur dynamischen Spannungsregelung (ohne Versorgungsunterbrechung) eingesetzt werden.

Weitere Einrichtungen zur Erhaltung der Systemstabilität im elektrischen Netz befinden sich in den höheren Netzebenen. Hierzu zählen die zentralen Großkraftwerke mit ihren Turbosätzen, die große Schwungmassen besitzen mit denen auf Frequenzänderungen, u.a. verursacht durch Laständerungen, augenblicklich reagiert werden kann. Die Einrichtungen und der Ablauf der Frequenzregelung im Verbundnetz durch Momentanreserve, Primär-, Sekundär- und Tertiärregelung sind nicht Bestandteil dieser Arbeit, sodass hier auf weitere Literatur (u.a. [14]) verwiesen wird.

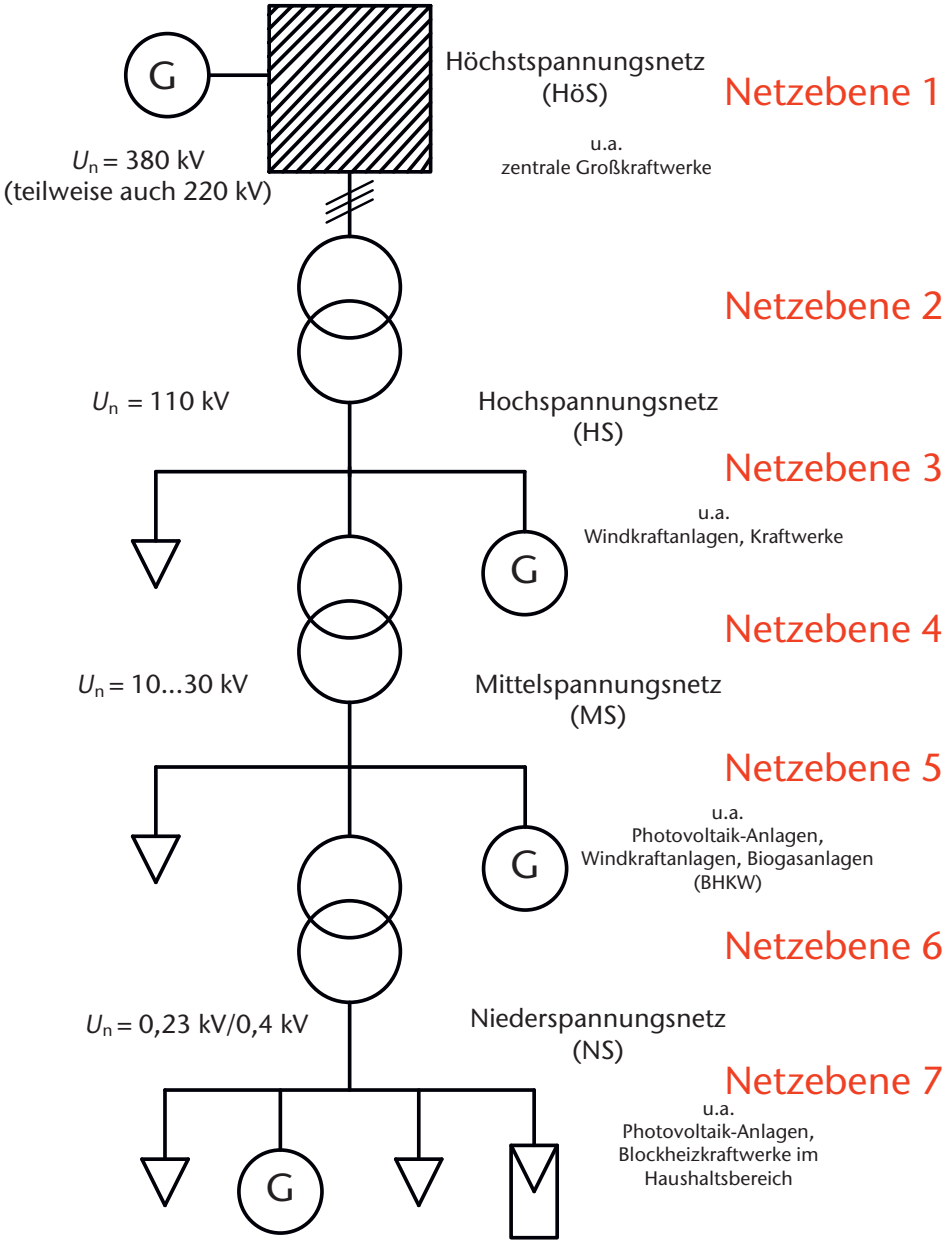

Abbildung 1-3: Aufbau des elektrischen Energiesystems in Deutschland (eigene Darstellung in Anlehnung an [15])

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Aktoren zur Spannungsregelung im Verbundnetz werden kurz vorgestellt. Zu diesen zählen in erster Linie die Synchrongeneratoren der zentralen Großkraftwerke, die durch entsprechende Gleichstromerregung des Läufers den Blindleistungsfluss zwischen Generatorklemmen und Netz regeln können und hiermit die Spannung im Netz beeinflussen. Die gezielte Einstellung der Blindleistung (induktives oder kapazitives Verhalten des Generators) ermöglicht eine Kompensation der Spannungsänderungen über den Netzbetriebsmitteln (Leitungen, Transformatoren).

Prinzipiell werden die zentralen Spannungsregler in drei Klassen eingeteilt. Die ersten Stellglieder greifen direkt auf die Höhe der Knotenspannung ein, hierzu zählen unter Last schaltbare Transformatoren mit Laststufenschalter (OLTC) und Längsregler mit Zusatztransformatoren, mit denen Zusatzspannungen eingeprägt werden. In der zweiten Klasse befinden sich u.a. die bereits erwähnten Synchronmaschinen mit variabler Erregung oder rotierende Phasenschieber (u.a. leerlaufende Synchronmaschinen). Die dritte Klasse beinhaltet Kondensatoren oder Drosselspulen, die zur Blindleistungskompensation eingesetzt werden. [14]

Da sich das elektrische Verhalten der einzelnen Netzebenen unterscheidet, kann im Bereich des Niederspannungsverteilnetzes nur eine Spannungsregelung durch die beschriebenen Aktoren der ersten Klasse (Transformatoren mit Laststufenschalter, Längsregler) erfolgen, die direkten Einfluss auf die Höhe der Knotenspannungen besitzen. Dies ist mit dem überwiegenden ohmschen Anteil in den Leitungen der Niederspannungsverteilnetzebene zu begründen, wie im folgenden Kapitel (1.3.2) beschrieben wird.

1.3.2 Niederspannungsverteilnetze

Niederspannungsverteilnetze in Deutschland besitzen eine Nennspannung von $U_{n,LL}$=0,4 kV / $U_{n,LN}$=0,23 kV und sind im Vergleich zu den höheren Spannungsebenen zum Anschluss einphasiger Lasten und Erzeugereinheiten als Vierleitersystem ausgelegt. Die Transformatoren in den Ortsnetzstationen sind als Dyn-Transformatoren (D: Dreiecksschaltung der Wicklung auf der Oberspannungsseite, y: Sternschaltung der Wicklung auf der Unterspannungsseite, n: geerdeter Sternpunkt als Neutralleiter) realisiert. Durch die Niederspannungsverteilnetzebene werden überwiegend Haushalte, Bürogebäude, kleinere Industrieunternehmen und landwirtschaftliche Betriebe versorgt. Die gewählte Netzform (s. Abbildung 1-4) hängt von der Lastdichte ab. Maschennetze werden bei Lastdichten ab 5 MVA/km² [15] gewählt, während für geringere Lastdichten, wie unter anderem im ländlichen Bereich, Strahlennetze oder Strahlennetzen mit Ringleitungen realisiert werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

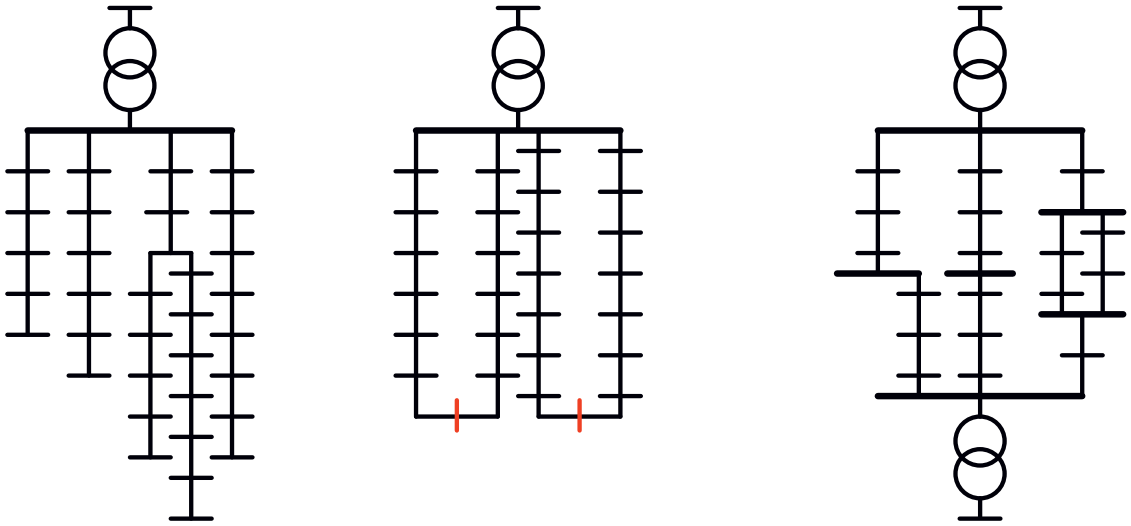

Abbildung 1-4: Mögliche Netzformen für Niederspannungsverteilnetze links: Strahlennetz, mitte: Ringleitung (offen betrieben), rechts: Maschennetz (eigene Darstellung in Anlehnung an [15])

In den vergangenen Jahren erfolgte in dieser Netzebene, vorangetrieben durch festgelegte Vergütungssätze für die eingespeiste elektrische Energie durch das Erneuerbare Energien Gesetz [2], ein enormer Zubau an Photovoltaik-Anlagen, vor allem im ländlichen Bereich [16]. Die Untersuchungen beschränken sich wegen der geringeren Lastdichte [15] im ländlichen Bereich daher auf die Strahlennetze. Die Problematik die sich im Niederspannungsverteilnetz durch den PV-Anlagenzubau ergibt, wird anhand des Ersatzschaltbildes in Abbildung 1-5 dargestellt. Die wesentlichen Bestandteile sind die Kurzschlussimpedanzen von Transformator und Kabel. Das Leitungsersatzschaltbild ist für diese Betrachtung wie dargestellt zulässig, da es sich bei den auftretenden Kabel- und Leistungslängen im Niederspannungsnetz um elektrisch kurze Leitungen (l < 100 km) ([17], S. 55) handelt. *(Hinweis: Die zulässige Vereinfachung im Vergleich zum vollständigen Leitungsersatzschaltbild wird im Abschnitt 3.1 beschrieben.)*

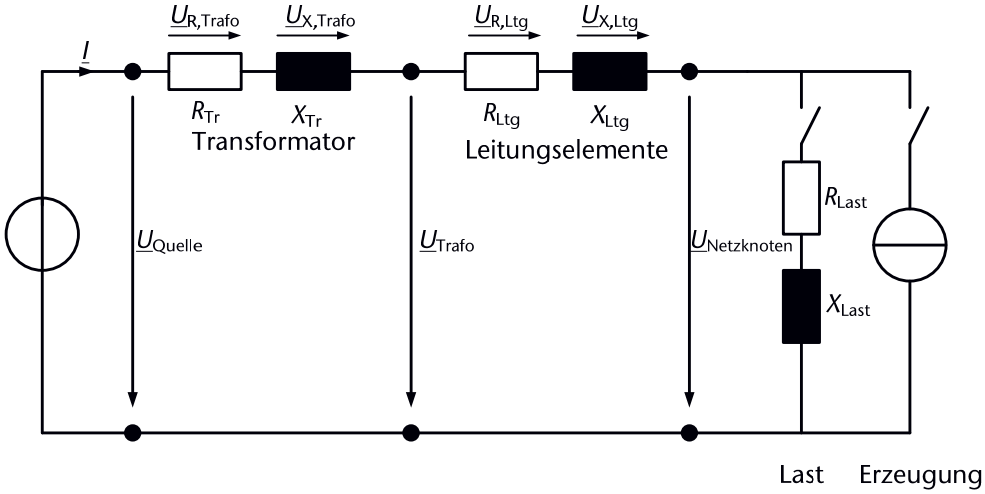

Abbildung 1-5: Einphasiges Ersatzschaltbild für die exemplarische Betrachtung der Spannungsänderungen über den Netzelementen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.