

Simulationsmodelle elektrischer Gebäudeinstallationen zur Untersuchung von Spannungsqualitätsproblemen

Mateo LIPPICH GOLOBART*, Joachim PRZIBYLLA, Rolf WITZMANN

Technische Universität München, Professur für Elektrische Energieversorgungsnetze,
Arcisstr. 21, 80333 München, +49 89 289 22006, mateo.lippich@tum.de,
<https://www.ei.tum.de/hsa>

Kurzfassung: Die stete Zunahme leistungsstarker Prosumer in Niederspannungsverteilnetzen kann zu einer Verschlechterung der Spannungsqualität führen. Das Forschungsprojekt *U-Quality* untersucht und bewertet die Auswirkungen zukünftiger Netznutzungsfälle auf die Spannungsqualität und baut dabei unter anderem auf Feld- / Labormessungen und Netzsimulationen. Die Simulationen werden in einem Detailgrad durchgeführt, der die gebräuchlichen Netzmodelle von Niederspannungsverteilnetzen übersteigt, indem die elektrischen Gebäudeinstallationen berücksichtigt werden. Dafür wurden plausible Simulationsmodelle elektrischer Gebäudeinstallationen entwickelt. In den Modellen werden Gebäudetypen und -größen, sowie Baujahre unterschieden, die den Gebäudebestand in Deutschland abbilden. Neben der theoretischen Entwicklung der Modellinstallationen wurden diese in einer Simulationssoftware umgesetzt. Die Funktionalität der Modelle wurde bestätigt, indem Untersuchungen zum Einfluss der elektrischen Gebäudeinstallationen auf die Spannungsunsymmetrie durchgeführt wurden.

Keywords: Spannungsqualität, Power Quality, Spannungsunsymmetrie, Niederspannung, Gebäudeinstallation, Netzmodellierung, Simulationsmodelle, U-Quality

1 Motivation

Der schnell voranschreitende Klimawandel erfordert eine drastische Reduktion der weltweiten Treibhausgasemissionen. Diese lässt sich in Europa nur durch tiefgreifende Umstrukturierungen in allen Lebens- und Wirtschaftsbereichen erreichen, wobei allen voran die Energiewende steht. Der Wandel unseres Energiesystems von hauptsächlich fossilen zu größtenteils erneuerbaren Energieträgern erfordert unter anderem die Umstellung des Verkehrs- und des Wärmesektors auf elektrische Energie. Durch die Energiewende kommt es in den nächsten Jahrzehnten zu einer stark wachsenden Durchdringung der Niederspannungsebene mit leistungsstarken Prosumern auf Seite der Netzkunden, wie Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge, Photovoltaikanlagen, Batteriespeichersystemen und Wärmepumpen.

Da diese Prosumer mittels Umrichter an die Energieversorgungsnetze gekoppelt sind, kann die Integration einer Vielzahl solcher Geräte einen erheblichen negativen Einfluss auf die Spannungsqualität in diesen Netzen haben. Die Einhaltung der Grenzwerte der einzelnen Spannungsqualitätsmerkmale, die in der DIN EN 50160 vorgegeben sind, ist für einen stabilen Netzbetrieb elementar. [1]

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderte Forschungsprojekt *U-Quality* [2] untersucht die Auswirkung der oben genannten Geräteklassen, sowie deren Betriebsweisen, auf die Spannungsqualität in Niederspannungsverteilnetzen. Das Projekt geht der Forschungsfrage mit einem dreigliedrigen Ansatz aus Messkampagnen, Simulationen und daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen nach. Neben Feldmesskampagnen zur Aufnahme des momentanen Zustandes der Spannungsqualität, spielen Laborversuche und Simulationen von zukünftigen Netznutzungsszenarien eine wichtige Rolle. Für die Simulationen, deren Ergebnisse in Bezug auf Spannungsqualitätsmerkmale ausgewertet werden, ist daher die Bildung möglichst allgemeingültiger und valider Netzmodelle notwendig.

Die Untersuchungen im Projekt *U-Quality* beschränken sich dabei nicht auf Modelle von Niederspannungsverteilnetzen im üblichen Detailgrad, also von der Ortsnetzstation zu den einzelnen Netzverknüpfungspunkten (Hausanschlusskästen). Sie werden auch auf die elektrischen Gebäudeinstallationen von Wohngebäuden ausgeweitet, um deren Einfluss auf die Spannungsqualität zu untersuchen. Dafür wurden verschiedene Simulationsmodelle von elektrischen Gebäudeinstallationen erstellt, die die tatsächlichen Gegebenheiten möglichst realitätsnah abdecken sollen.

2 Grundlagen der Modelle

Elektrische Gebäudeinstallationen können einen großen Anteil an der gesamten Leitungslänge in Niederspannungsverteilnetzen haben und nehmen üblicherweise eine große Anzahl unsymmetrischer Lasten auf. Daher ist eine gesonderte Untersuchung ihres Einflusses auf die Spannungsqualität erforderlich. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Gebäude in Deutschland, sind die elektrischen Gebäudeinstallationen, ähnlich wie die Niederspannungsverteilnetze, stark heterogen. Um aufgrund von Simulationen allgemeingültige Aussagen treffen zu können, ist deshalb die Bildung von Modellen notwendig, die die Variationsbreite der vorhandenen Gebäudeinstallationen abbilden können. Diese unterscheiden sich untereinander hauptsächlich in der Anzahl der Stromkreise, in der Länge der Stromkreise, sowie in der Art der Sicherungstechnik und in der Art der verlegten Leitungen. Die Anzahl und Länge der Stromkreise werden im Wesentlichen von der Struktur und der Größe der Gebäude vorgegeben. Die Ausführung der Sicherungstechnik und der Leitungen hängt dagegen vom Baujahr und Sanierungsstand der Gebäude ab. Daher werden im Folgenden die Gebäudestrukturen und die Altersstruktur des Gebäudebestands in Deutschland analysiert.

2.1 Gebäudestrukturen

Die Gebäudestruktur bestimmt, aufgrund der Anzahl der Räume und der Wohnfläche, die Anzahl und die Länge der Stromkreise innerhalb einer elektrischen Gebäudeinstallation. Beispielsweise besitzen Einfamilienhäuser üblicherweise, aufgrund einer größeren Anzahl an Räumen und einer größeren Wohnfläche, eine größere Anzahl an Stromkreisen und größere Stromkreislängen als Geschosswohnungen. Als Stromkreis wird dabei eine, üblicherweise einphasige, Leitung bezeichnet, die gesondert abgesichert ist. Die Leitung kann sich dabei in ihrem Verlauf beliebig verzweigen. Eine gute Übersicht über die Gebäudestrukturen in Deutschland geben die Wohngebäudestatistiken des Zensus. Für die folgenden Analysen wurden die Ergebnisse des Zensus 2011 verwendet. [3]

Der erste relevante im Zensus erhobene Parameter ist die Art der Gebäude. Unterschieden wird zwischen freistehenden Häusern, Doppelhaushälften, sowie gereihten Häusern. Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Gebäudetypen in Deutschland. Über 60 % der Gebäude in Deutschland sind freistehende Häuser. Dabei kann es sich einerseits um Einfamilienhäuser, als auch um freistehende Mehrfamilienhäuser handeln. Die restlichen Gebäude teilen sich auf in Doppelhaushälften und gereichte Häuser, die wiederum Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser sein können.

Ein weiteres wichtiges Merkmal der Gebäudestruktur ist die Anzahl der enthaltenen abgeschlossenen Wohneinheiten. Die Verteilung der Wohngebäude in Deutschland nach der Anzahl der Wohneinheiten ist in Abbildung 2 dargestellt. 65,8 % der Gebäude enthalten eine Wohneinheit, 16,9 % zwei Wohneinheiten und 17,3 % drei oder mehr Wohneinheiten. Aus den Verteilungen in Abbildung 1 und Abbildung 2 lässt sich schließen, dass es sich bei ca. 65 % der Wohngebäude in Deutschland um Einfamilienhäuser handelt. Die restlichen 35 % teilen sich in etwa gleich auf Doppelhaushälften / Reihenhäuser und Mehrfamilienhäuser auf.

Die letzte, für die Modellierung relevante Kennzahl ist die Wohnfläche. Abbildung 3 zeigt die Verteilung der Wohnflächen von Wohngebäuden in Deutschland. Es bilden sich insgesamt drei ähnlich große Bereiche heraus, und zwar Wohngebäude mit mehr als 100 m², mit 60 – 100 m² und mit unter 60 m² Wohnfläche.

Um den Gebäudebestand in Deutschland gut abbilden zu können, wurden aus den erhobenen Daten zur Wohngebäudestruktur drei unterschiedliche Gebäudeklassen definiert, deren elektrische Gebäudeinstallation modelliert wird. Die Klassen und die zugehörigen Parameter sind in Tabelle 1 aufgeführt.

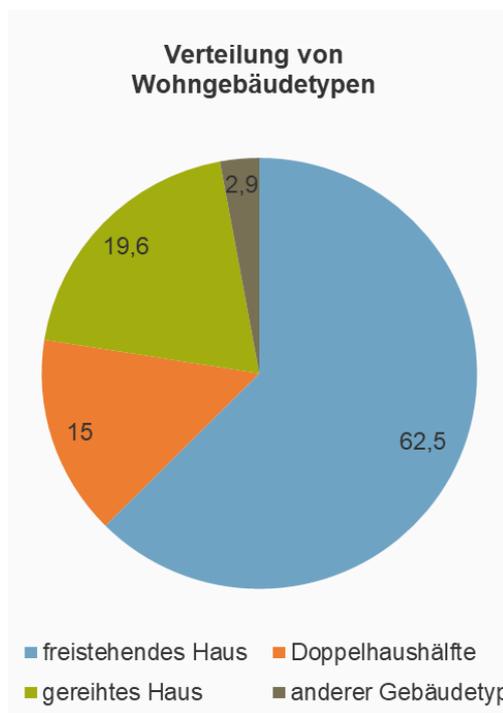


Abbildung 1: Verteilung der Wohngebäudetypen in Deutschland, nach [3]

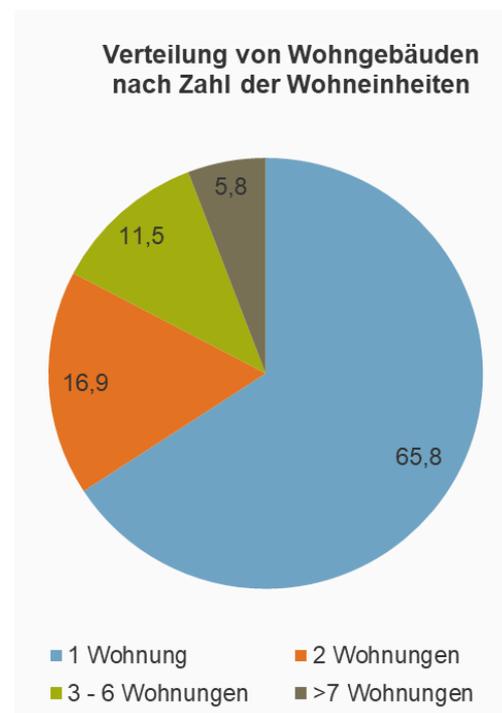


Abbildung 2: Verteilung der Wohngebäude in Deutschland nach Zahl der Wohneinheiten, nach [3]

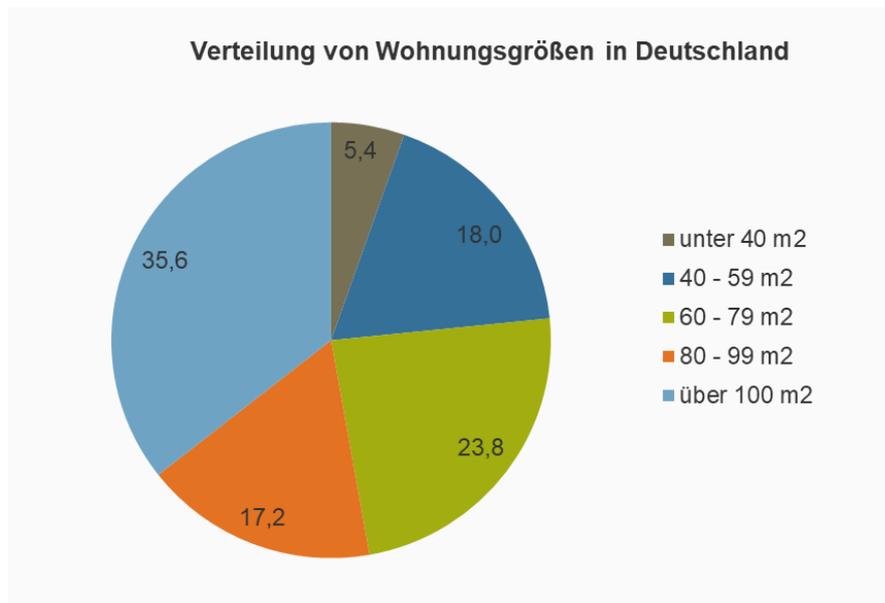


Abbildung 3: Verteilung der Wohneinheiten in Deutschland nach Wohnfläche, nach [2]

Tabelle 1: Modelle und ihre Parameter

Klasse	Gebäudetyp	Wohneinheiten	Wohnfläche
Einfamilienhaus	Freistehendes Haus	1	120 m ²
Reihenhaus	Doppelhaushälfte	1 – 2	80 m ²
	Gereihtes Haus		
Wohnung	Freistehendes Haus	>1	50 m ²
	Gereihtes Haus		

2.2 Altersstruktur des Gebäudebestands

Neben der Struktur eines Wohngebäudes ist das Baujahr ein entscheidender Einflussfaktor auf die Ausführung der elektrischen Gebäudeinstallation. Im Laufe der letzten Jahrzehnte haben verschiedene Änderungen in der verwendeten Technik und den verwendeten Materialien, sowie in den zugrundeliegenden Planungsrichtlinien und Normen stattgefunden. Daher gibt es deutliche Unterschiede zwischen älteren und modernen Gebäudeinstallationen. Aufschluss über die verwendete Gebäudeinstallation geben zunächst die Baujahre der Gebäude. Diese wurden ebenfalls im Zensus erhoben und die dort resultierende Verteilung der Baujahre ist in Abbildung 4 dargestellt. [3] Da mit steigendem Alter der Gebäude eine Modernisierung der Gebäudeinstallation immer wahrscheinlicher wird, ergibt sich ein Zeitraum von sehr alten und sehr jungen Baujahren mit modernen Installationen, sowie ein Zeitraum von Baujahren mit älteren Installationen.

Der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) hat im Jahr 2015 eine Zustandserhebung der elektrischen Anlagen in Wohngebäuden durchgeführt. [4] In dieser wurde unter anderem das Alter der vorhandenen elektrischen Gebäudeinstallation anhand verschiedener Ausstattungsmerkmale bestimmt. Es konnte dabei festgestellt werden, dass die Mehrheit der ältesten Gebäude, insbesondere mit Baujahren vor 1950, aufgrund von elektrotechnischen Sanierungen „moderne“ Gebäudeinstallationen aufweisen.

Diese sind ebenfalls in Gebäuden mit Baujahren ab 1980 vorzufinden. Gebäude, die im Zeitraum 1950 – 1979 erbaut wurden, weisen dagegen die ältesten Gebäudeinstallationen auf. [4]

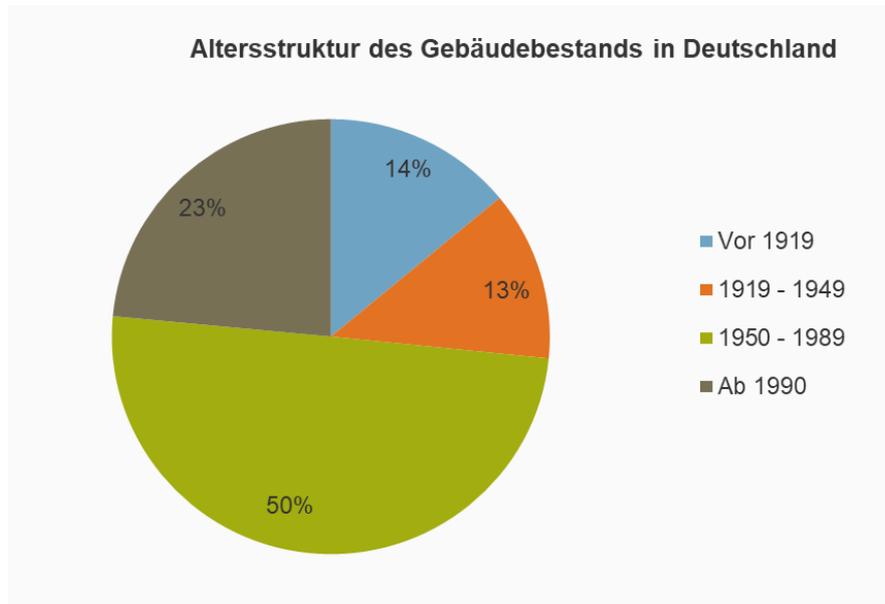


Abbildung 4: Altersstruktur des Gebäudebestands in Deutschland, nach [3]

Der wesentliche Unterschied zwischen modernen und älteren Gebäudeinstallationen liegt in den verwendeten Leitungen und dem Ausstattungsgrad der Gebäude. In den Jahren bis ca. 1980 wurden üblicherweise Stegleitungen vom Typ NYIF-J verwendet, wohingegen in jüngeren Installationen Mantelleitungen vom Typ NYM-J verlegt wurden. Die beiden Kabeltypen unterscheiden sich in der geometrischen Anordnung der einzelnen Adern und den davon abhängigen elektrischen Parametern. In der Zustandserhebung wurde außerdem festgestellt, dass ein Großteil der elektrischen Gebäudeinstallationen nicht der Mindestausstattung nach DIN 18015-2 [5] entspricht.

Da für die älteren Baujahre keine genormte Mindestausstattung definiert ist, wird hier angenommen, dass der Ausstattungsgrad noch unter dem Mindestausstattungsgrad der modernen Gebäudeinstallationen liegt. Daraus ergeben sich für die Modellierung zwei relevante Zeiträume der Baujahre:

- Baujahr 1970 – 1980: Gebäudeinstallation mit Stegleitungen Typ NYIF-J. Ausstattungsgrad unter Mindestausstattung nach DIN 18015-2 [5].
- Baujahr 2010 – 2020: Gebäudeinstallation mit Mantelleitungen Typ NYM-J. Ausstattungsgrad entsprechend Mindestausstattung nach DIN 18015-2 [5].

3 Umsetzung

Aus der Analyse der Gebäude- und der Altersstruktur des Gebäudebestands in Deutschland in Abschnitt 2 ergeben sich insgesamt sechs unterschiedliche Modelle von Gebäudeinstallationen (Zwei Baujahre je Klasse). Diese werden im Folgenden entsprechend verschiedener Normen und Planungsrichtlinien aufgebaut und schließlich in einer Simulationsumgebung umgesetzt.

3.1 Modellbildung

Aus der Wohnfläche und der typischen Raumanzahl der Gebäudetypen ergeben sich für die drei unterschiedlichen Gebäudeklassen entsprechende Grundrisse, auf denen die Auslegung der jeweiligen Gebäudeinstallation beruht. Die relevanten Kriterien bei der Planung von Gebäudeinstallation sind die elektrische Mindestausstattung, die Leitungsführung, sowie der zulässige Spannungsfall über die Leitungen.

Die Mindestausstattung [5] [6] definiert in Abhängigkeit der Wohnfläche und Raumnutzung die Anzahl der einzelnen Stromkreise und die Anzahl der Anschlusspunkte je Raum, also Steckdosen, Beleuchtungsanschlüsse und Anschlüsse für besondere Verbraucher, die über eigene Stromkreise verfügen. Daraus ergeben sich für die einzelnen Modelle die benötigten Stromkreise und Anschlusspunkte für Lasten.

Die Leitungslängen der einzelnen Stromkreise ergeben sich schließlich aus der Strecke zwischen Stromkreisverteilerkasten und den jeweiligen Anschlusspunkten. Die zu überbrückende Distanz ist abhängig vom Grundriss und der Leitungsführungsvorgaben, nach denen die Leitungen verlegt werden. Im Jahr 1982 wurde die DIN 18015-3 [7] eingeführt, in der sogenannte Installationszonen definiert werden. Diese besagen, dass Leitungen nur horizontal in der Decke, dem Boden, sowie vertikal in der Wand geführt werden dürfen. Diese Vorgabe wurde für die Erstellung der modernen Gebäudeinstallationen berücksichtigt. Da die Norm für die älteren Baujahre nicht gegolten hat und die Stegleitungen typischerweise im Putz geführt wurden, beruhen die Leitungslängen hier jeweils auf der kürzesten möglichen Verbindungslinie. Die maximale mögliche Leitungslänge der einzelnen Stromkreise in den Modellen ergibt sich aus dem nach [8] erlaubten Spannungsabfall, der je nach Verbrauchertyp 3 % - 5 % beträgt.

In Tabelle 2 sind für die einzelnen Modelle die Anzahl der Stromkreise, die gesamte Leitungslänge sowie die Gesamtanzahl der Anschlusspunkte aufgeführt. Daraus wird deutlich, dass die älteren Gebäudeinstallationen eine kleinere Anzahl an Stromkreisen und Anschlusspunkten für Lasten aufweisen als die modernen Gebäudeinstallationen. Außerdem zeigt sich die Abhängigkeit der Kennwerte von der Größe der zugrundeliegenden Gebäudetypen.

Tabelle 2: Kennwerte der modellierten Gebäudeinstallationen

Klasse	Baujahr	Anzahl Stromkreise	Gesamte Leitungslänge	Gesamtanzahl Anschlusspunkte
Einfamilienhaus	2010	25	518,7 m	99
	1980	10	338,65 m	63
Reihenhaus	2010	14	296,2 m	66
	1980	8	223,5 m	54
Wohnung	2010	7	119,25 m	27
	1980	3	94,9 m	23

3.2 Modellierung in Simulationssoftware PowerFactory

Den letzten Schritt in der Modellbildung stellt der Aufbau der Modelle in einer für die Untersuchung geeigneten Simulationsumgebung dar. Für das Forschungsprojekt wurden die Modelle in der Simulationssoftware DigSILENT PowerFactory erstellt, um mit Hilfe von quasi-dynamischen Lastflussrechnungen den Einfluss der Gebäudeinstallationen auf die Spannungsunsymmetrie zu untersuchen.

Für die Umsetzung der rein topologischen Modelle aus Abschnitt 3.1 ist die Definition der elektrischen Parameter der Leitungen notwendig. Um die induktiven und kapazitiven Koppelemente der Leitungsimpedanzen realitätsgetreu abzubilden, sind die Leitungen durch drei einzelne Leiter nachgebildet (Phase, Neutral und Schutzleiter). Diese sind entsprechend der Geometrie des jeweiligen Kabeltyps zu Kabelsystemen zusammengefasst. In Abbildung 5 sind die geometrischen Anordnungen der beiden verwendeten Kabeltypen dargestellt. Der Hauptunterschied liegt in der Anordnung der Leiter, die bei den Stegleitungen in einer Ebene nebeneinander liegen, bei den Mantelleitungen an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks.

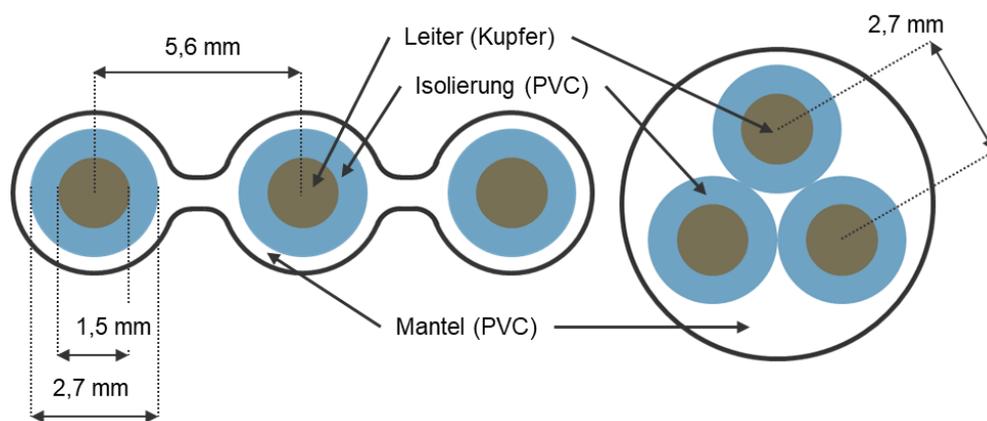


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Stegleitung Typ NYIF-J (links) und der Mantelleitung Typ NYM-J (rechts); Leiterradius und Isolierungsdicke bei beiden Typen gleich

Für die Berechnung von Lastflüssen ist außerdem die Definition von Lasten und die Definition eines externen Netzes als Bilanzknoten notwendig. Das externe Netz stellt im Fall der Gebäudeinstallationen das übergeordnete Verteilnetz dar. Ein wichtiger Parameter für die simulative Untersuchung von Spannungsunsymmetrie ist hier die Kurzschlussleistung. Gemäß $k_{u2} = \frac{S_{un}}{S_k}$ [9] ist der Unsymmetriefaktor k_{u2} , mit welchem das Maß der vorherrschenden Spannungsunsymmetrie beschrieben wird, proportional zum Verhältnis aus der unsymmetrischen Scheinleistung S_{un} zur Kurzschlussleistung S_k am Anschlusspunkt. Daher hat die Vorgabe der Kurzschlussleistung des übergeordneten Netzes einen direkten Einfluss auf die sich bei einer vorgegebenen unsymmetrischen Belastung einstellenden Spannungsunsymmetrie. In Niederspannungsverteilsnetzen hängt die Kurzschlussleistung vor allem von der Impedanz der Leitungen und damit von der Leitungslänge zwischen dem Transformator und dem Anschlusspunkt ab, wobei die Kurzschlussleistung am Transformator am größten und am Ende eines langen Stranges am geringsten ist. Dadurch erzeugt die gleiche unsymmetrische Last in Transformatornähe eine geringere Spannungsunsymmetrie als am Strangende. In Impedanzmessungen an verschiedenen Punkten in unterschiedlichen Niederspannungsverteilsnetzen hat sich für die Kurzschlussleistung an Hausanschlusskästen ein typischer Bereich von 0,3 ... 3,4 MVA ergeben. In den weiteren simulativen Untersuchungen im Sinne

einer Worst-Case-Betrachtung ist die Kurzschlussleistung des übergeordneten Netzes auf 0,3 MVA festgesetzt. Die Gebäudeinstallation ist schließlich, zwischen Hausanschlusskasten und Stromkreisverteilerkasten, über eine 25 m lange Hausanschlussleitung vom Typ NAYY 4x50 mm² an das externe Netz gekoppelt.

Die letzten Elemente, die für die Durchführung von Lastflussrechnung notwendig sind, sind elektrische Lasten. In den Modellen der Gebäudeinstallationen sind diese als einphasige Lasten (Phase-Neutralleiter) realisiert, die an die, in den Schaltplänen vorgegebenen Anschlusspunkte angebunden sind. Den Lasten können beliebige Wertekombinationen aus Wirkleistung und Blindleistung vorgegeben werden (PQ-Lasten).

Der gesamte Aufbau der Modelle ist schematisch in Abbildung 6 für einen Stromkreis mit einem Anschlusspunkt dargestellt.

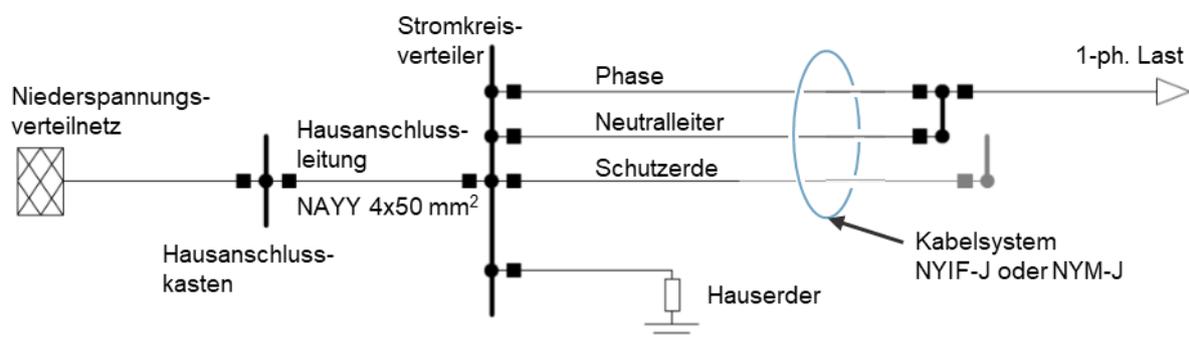


Abbildung 6: Schematischer Aufbau der Gebäudeinstallationen in der Simulationsumgebung

4 Simulationen

Im Folgenden wird der exemplarische Simulationsablauf und die Auswertung der Simulationsergebnisse hinsichtlich der Spannungsunsymmetrie erläutert. Das Ziel der simulativen Untersuchungen ist, anhand realistischer Haushaltslastprofile den möglichen Einfluss der Gebäudeinstallation auf die Spannungsunsymmetrie zu ermitteln. Die Durchführung von statistischen Variantenrechnungen unterstützt dabei die Aussagekraft der Ergebnisse. Die verwendeten Haushaltslastprofile stammen aus einer Erweiterung des Lastprofilgenerators aus [10]. Dieser erzeugt gemäß Nutzungs- und Besitzwahrscheinlichkeitsverteilungen verschiedener Geräte im Bottom-Up-Verfahren aus einzelnen Geräten, und den entsprechenden Lastprofilen, Haushaltslastprofile. Die Gerätelastprofile bestehen aus gemessenen Wirk- und Blindleistungsverläufen. Die Erweiterung des Lastprofilgenerators besteht unter anderem aus der zufälligen Zuteilung der einzelnen Verbraucher auf unterschiedliche Phasen. Die Wahrscheinlichkeiten der Zuordnung zu bestimmten Phasen ist dabei unterschiedlich (Phase 1: 40 %, Phase 2: 30 %, Phase 3: 30 %) um bereits durch die Lastverteilung eine Spannungsunsymmetrie hervorzurufen. Für die Untersuchungen in diesem Paper wurden 30 unterschiedliche Lastprofile verwendet. Die Lastprofile bilden jeweils die Wirk- und Blindleistungsbezüge von ca. 15 Geräte über den Zeitraum von einer Woche mit einminütiger Auflösung ab.

Neben der Verwendung unterschiedlicher Lastprofile, wird eine zusätzliche Variation erreicht, indem in jeder Simulation zwei weitere zufällige Zuordnungen erfolgen. Zunächst werden die

Phasenzuordnungen der einzelnen Stromkreise der Gebäudeinstallationen gewürfelt. Aus den Anschlusspunkten der einzelnen Stromkreise ergibt sich dadurch ein Pool aus möglichen Anschlusspunkten für jede Phase. Im zweiten Schritt werden diesen Anschlusspunkten die einzelnen Lastprofile der entsprechenden Phase zufällig zugeordnet. Durch die unterschiedlichen Positionen der einzelnen Anschlusspunkte in den Gebäudeinstallationen ergeben sich für die einzelnen Lasten jeweils andere Leitungslängen. Für jedes Lastprofil erfolgen in jedem Modell 80 Simulationen. Daraus ergeben sich je Modell 2400 gerechnete Varianten. Als Referenz dient ein reduziertes Modell, bei dem keine Leitungen vorhanden sind, sodass alle Lasten direkt mit dem Stromkreisverteiler verbunden sind. Dadurch kann hier die Spannungsunsymmetrie errechnet werden, die sich durch die entsprechende Lastverteilung ohne den Einfluss der Gebäudeinstallation am Hausanschlusskasten ergibt.

Die Ergebnisse der jeweils 80 simulierten Varianten der 30 unterschiedlichen Lastprofile im Referenzmodell sind in Abbildung 7 dargestellt. Dabei zeigen die unteren grünen Punkte die Werte des 5 %-Quantils der Spannungsunsymmetrie in Prozent, die am Stromkreisverteiler gemessen wurde. Orange in der Mitte zeigt das 50 %-Quantil und blau oben das 95 %-Quantil. Die auftretende Unsymmetrie liegt im Bereich von 0 % ... 0,68 %, bei einer maximal erlaubten Spannungsunsymmetrie in der Niederspannungsebene von 2 %. [1]

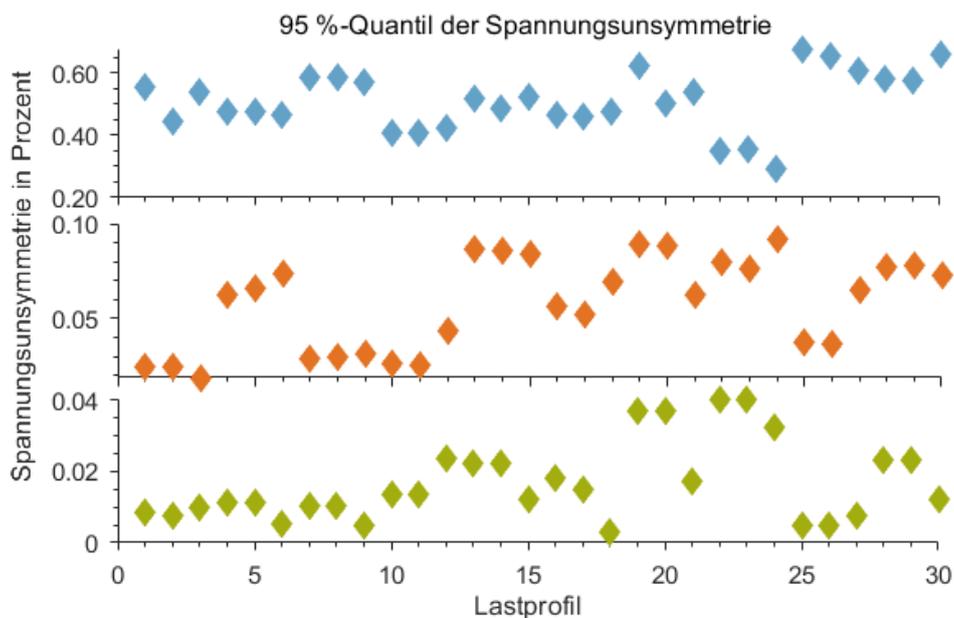


Abbildung 7: 5 %- (unten), 50 %- (Mitte), 95 %-Quantile (oben) der Spannungsunsymmetrie gemessen am Stromkreisverteiler im Referenzmodell aus den je 80 Varianten der 30 Lastprofile

Dieser Bereich deckt sich sehr gut mit Messwerten aus Feldmessungen an Hausanschlusskästen in verschiedenen Niederspannungsverteilnetzen. [2] Die auftretende Spannungsunsymmetrie unterscheidet sich teilweise deutlich zwischen den einzelnen Lastprofilen, das 95 %-Quantil liegt in einem Bereich von 0,29 % ... 0,68 %. Aufgrund der Streuung der Werte in den Ergebnissen der einzelnen Lastprofile sind für den Vergleich der Gebäudeinstallationen mit der Referenz die Ergebnisse der Simulationen mit den Modellen der Gebäudeinstallationen auf die jeweiligen Ergebnisse der Referenz normiert.

In Abbildung 8 sind die normierten 95 %-Quantile der Spannungsunsymmetrie aus allen Modellen als Boxplots dargestellt. Der Median (orange Linie) und der 25 % - 75 %-Bereich

(blaue Box) liegen bei allen Modellen über dem Referenzwert. Die gesamte Spannweite der Ergebnisse (grüne Linie) reicht bei allen Modellen auch geringfügig unterhalb des Referenzwertes. Die maximale Spannweite im Modell ‚Einfamilienhaus Modern‘ beträgt ca. 0,02 %. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Einfluss der Gebäudeinstallation auf die Spannungsunsymmetrie ermittelbar ist. Die Spannweite der Ergebnisse korreliert dabei mit der gesamten Leitungslänge der Modelle. So ist die Spannweite bei den beiden Modellen der Wohnungen am geringsten, ebenso wie hier die kürzeste Leitungslänge vorhanden ist. Die Modelle der Einfamilienhäuser weisen die größte Spannweite und die größte Leitungslänge auf. Ein Einfluss des Baujahrs auf die Spannungsunsymmetrie ist nicht deutlich auszumachen, woraus sich schließen lässt, dass der hauptsächlich relevante Einflussfaktor die Leitungslänge ist, wohingegen die Anzahl der Stromkreise einen geringen Einfluss hat.

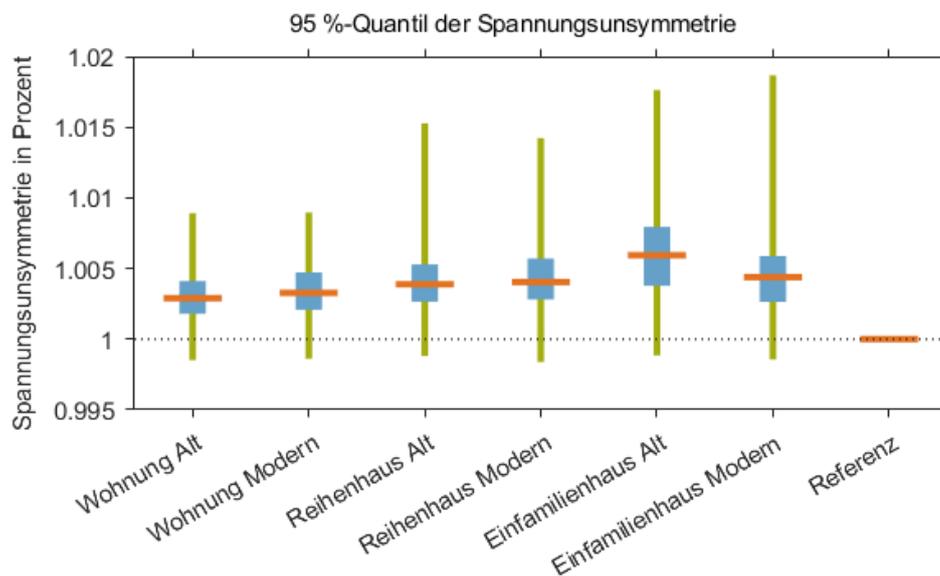


Abbildung 8: 95 %-Quantile der Spannungsunsymmetrie gemessen am Stromkreisverteiler in allen Modellen, normiert auf die Spannungsunsymmetrie im Referenznetz, Boxplots der 2400 Varianten

5 Fazit

Insgesamt wurden sechs Simulationsmodelle von verschiedenen Ausführungen elektrischer Gebäudeinstallationen entwickelt. Diese stellen durch die Abbildung der typischen Gebäudetypen, Gebäudegrößen und der typischen Baujahre eine Referenz für die bauliche Vielfalt in Deutschland dar. Mithilfe der Modelle wurden erste exemplarische Simulationen durchgeführt, in denen der Einfluss der elektrischen Gebäudeinstallation auf die Spannungsunsymmetrie untersucht wurde. Erste Simulationen haben gezeigt, dass die Funktionalität der Modelle gegeben ist und die Ergebnisse in plausiblen Bereichen liegen. Ein Einfluss der Gebäudeinstallationen ist messbar, bewegt sich allerdings erwartungsgemäß in einem sehr kleinen Bereich.

Die Modelle ermöglichen unter anderem weitere simulative Untersuchungen der anderen Spannungsqualitätsmerkmale, wie beispielsweise Flicker, Oberschwingungen und die Einhaltung des Spannungsbandes.

Die Grundrisse und die Schaltpläne der Modelle befinden sich im Anhang dieses Papers.

6 Referenzen

- [1] DIN EN 50160:2020-11 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen, 2020
- [2] C. Biedermann et al., Spannungsqualität vor dem Hintergrund des Anstiegs an Photovoltaik, Elektrofahrzeugen, PV-Batteriespeichersystemen und Power-to-Heat, 16. Symposium Energieinnovation, 2020, Graz
- [3] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland, Zensus 2011, 2014, Hannover
- [4] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie, Zustandserhebung elektrischer Anlagen für Gebäude, ZVEI, 2015, Frankfurt am Main
- [5] DIN 18015-2:2010-11 Elektrische Anlagen in Wohngebäuden – Teil 2: Art und Umfang der Mindestausstattung, Berlin, 2010
- [6] HEA – Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V., Elektrische Anlagen in Wohngebäuden Neufassung der RAL-RG 678, Berlin, 2011
- [7] DIN 18015-3:2016-09 Elektrische Anlagen in Wohngebäuden – Teil 3: Leitungsführung und Anordnung der Betriebsmittel, Berlin, 2016
- [8] DIN VDE 0001-520:2013-06 Errichtung von Niederspannungsanlagen – Teil 5-52: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Kabel- und Leitungsanlagen, Berlin, 2013
- [9] J. Meyer et al., General Definition of Unbalanced Power to Calculate and Assess Unbalance of Customer Installations, 2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM), 2019
- [10] M. Wagler, R. Witzmann, Erstellung und Evaluierung eines synthetischen Haushaltlastprofilgenerators für Wirk- und Blindleistung, 14. Symposium Energieinnovation, 2016, Graz

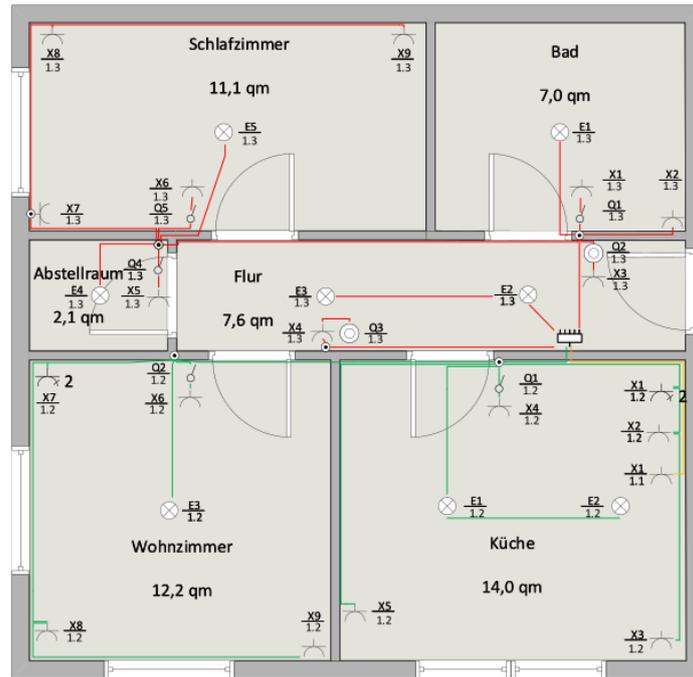
Gefördert durch:



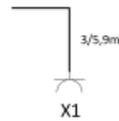
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

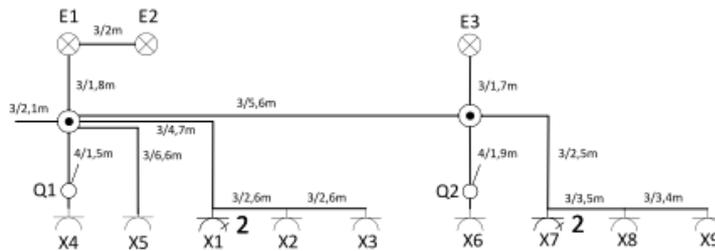
A.2 Wohnung Alt



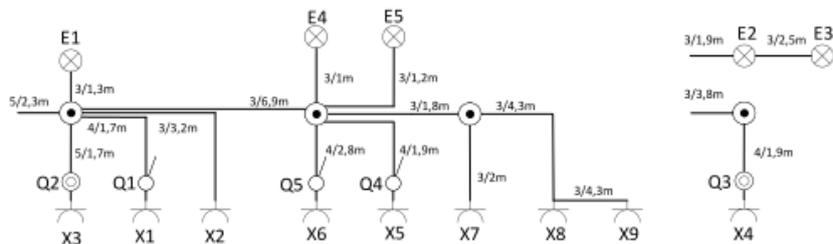
F1.1 E-Herd



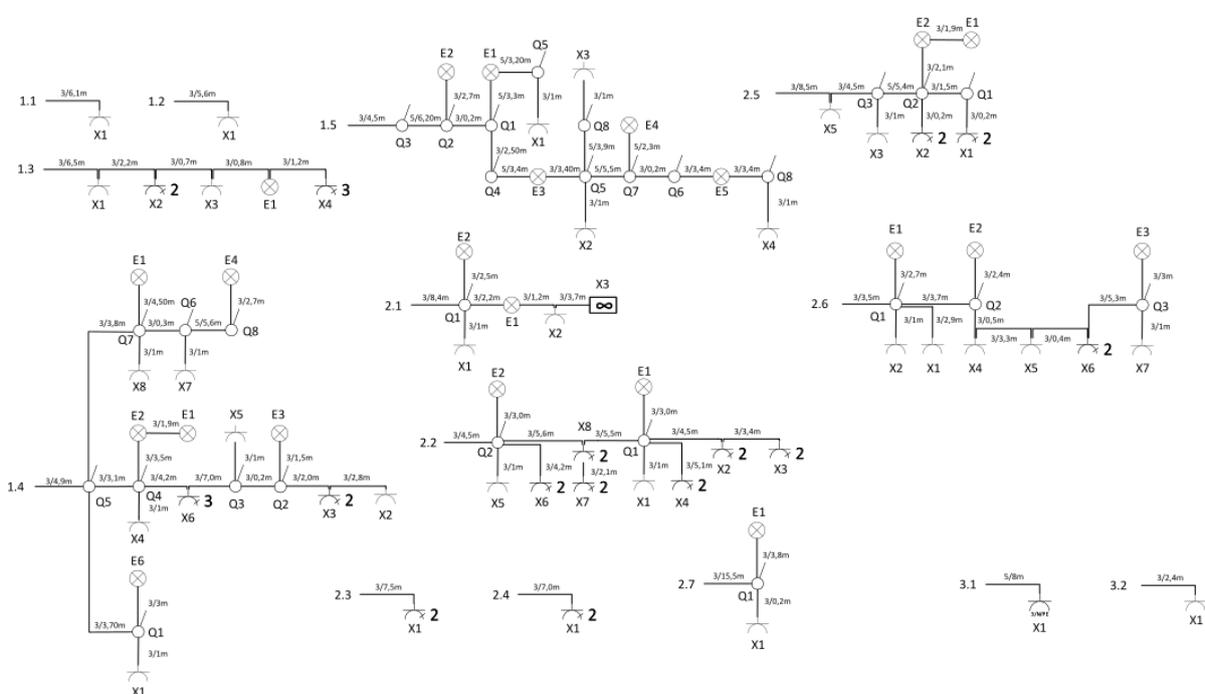
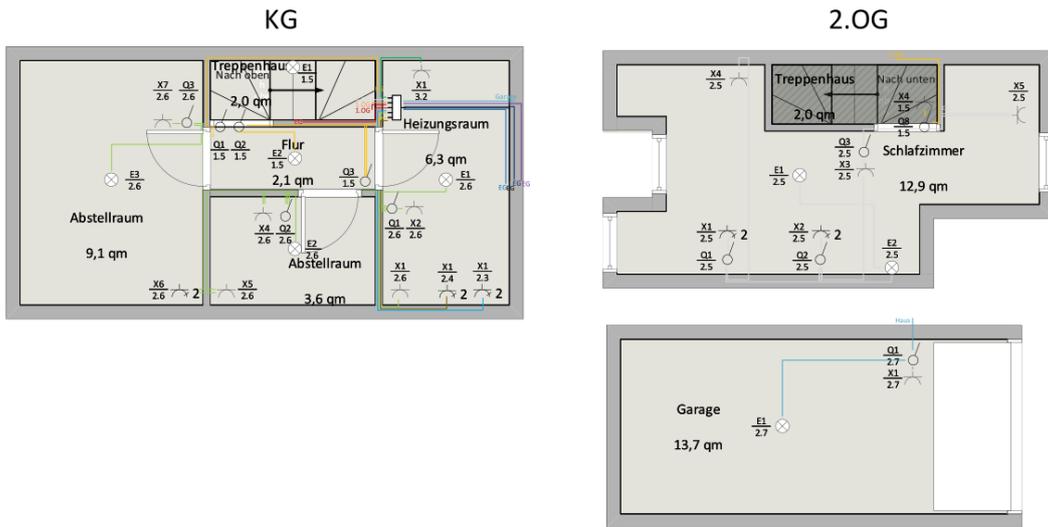
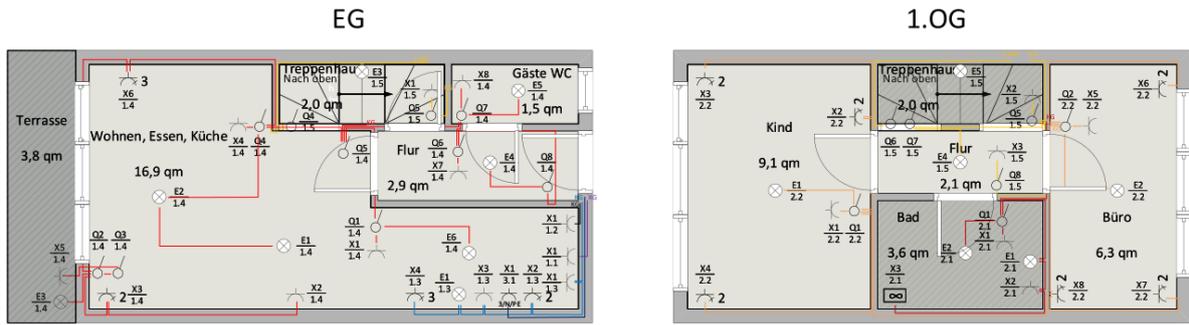
F1.2 Wohnzimmer, Küche



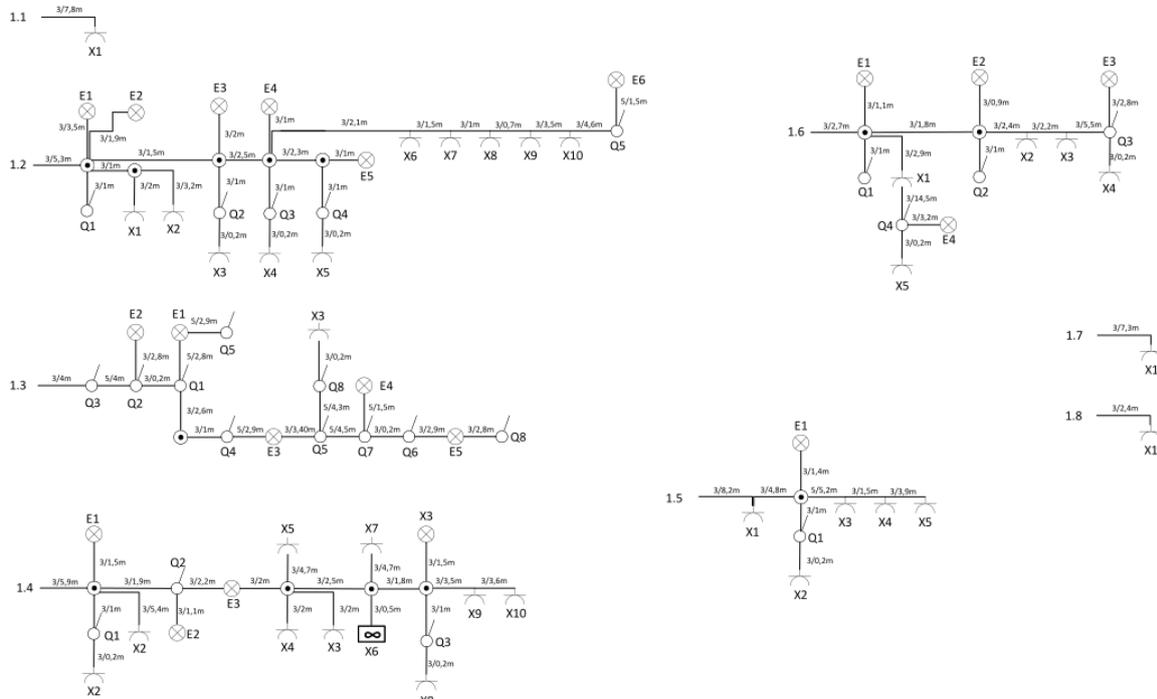
F1.3 Abstellraum, Schlafzimmer, Flur, Bad



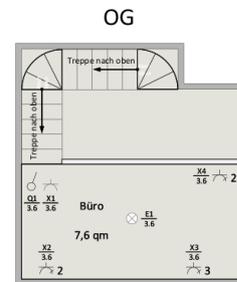
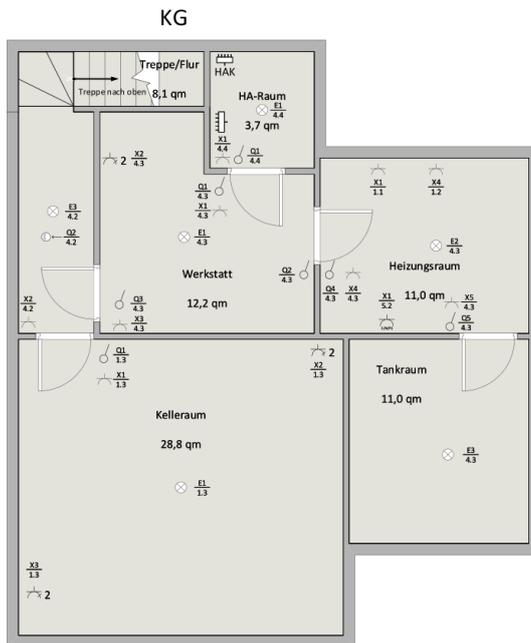
A.3 Reihenhaus Modern

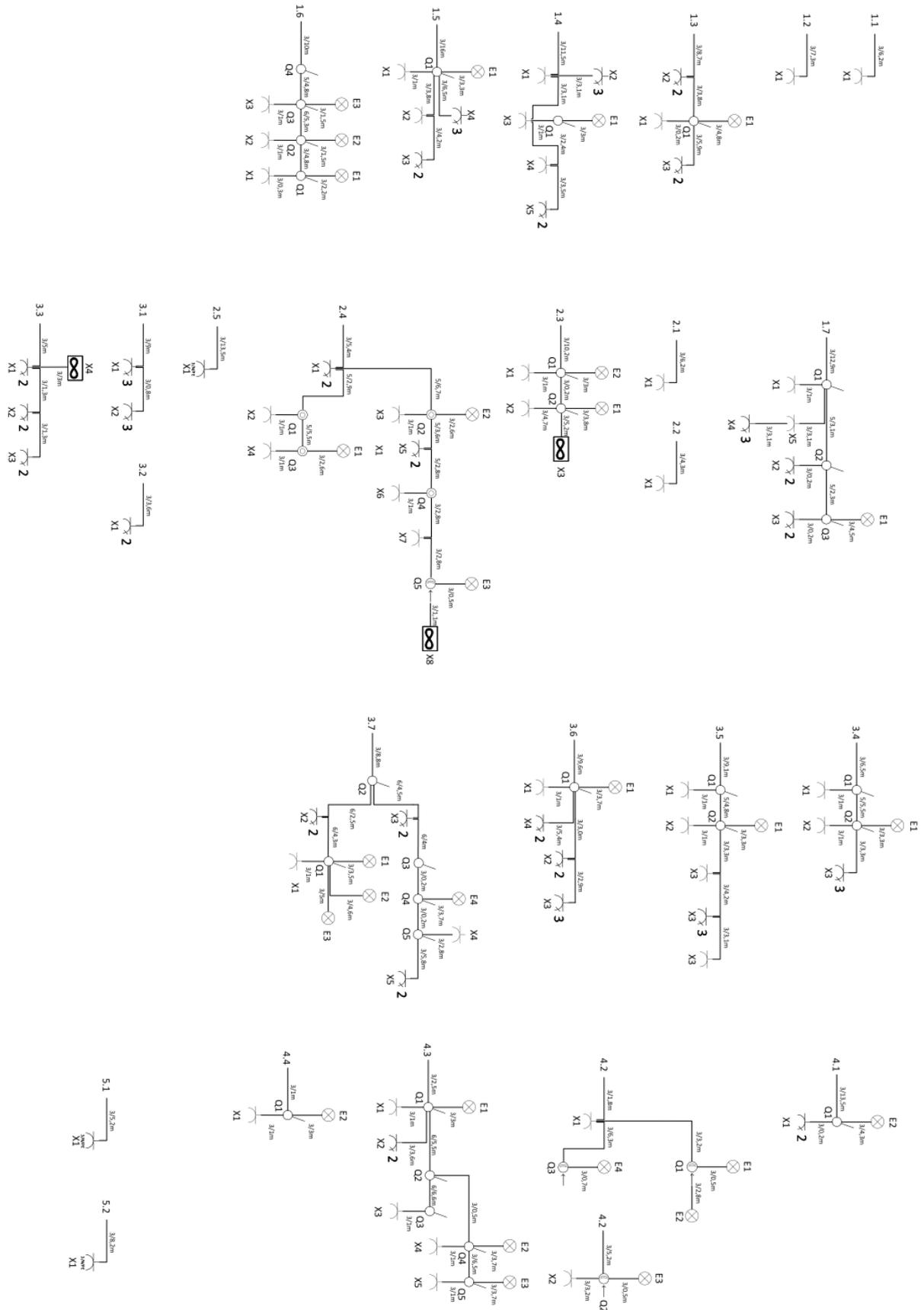


A.4 Reihenhaus Alt



A.5 Einfamilienhaus Modern





A.6 Einfamilienhaus Alt

