

# Synthetische NS-Netzmodelle für wissenschaftliche Untersuchungen

Wellßow, W.-H.; Weisenstein, M.; Rui, H.; Ma, H.; Benzarti, A.; Röhrenbeck, S.  
Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement

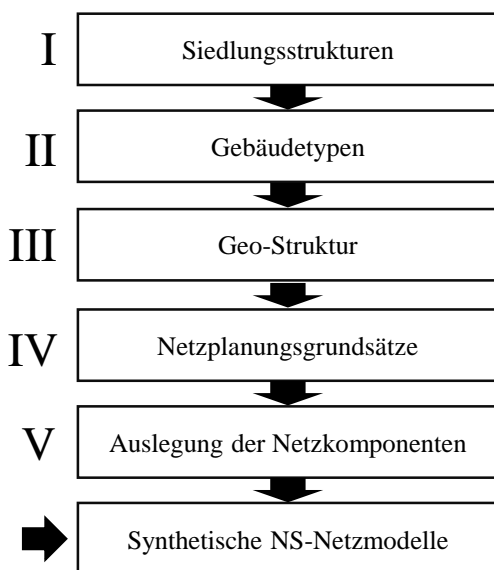
## 1 Motivation und Ziel des Beitrags

Durch die stetige Zunahme von dezentralen Erzeugungsanlagen, den anstehenden Smart-Meter Rollout sowie die zu erwartende Elektrifizierung des Verkehrssektors (E-Mobilität) steht die Netzplanung und Netzbetriebsführung von Niederspannungsnetzen (NS-Netzen) in Deutschland vor großen Herausforderungen. In den letzten Jahren wurden daher viele Studien, Forschungs- und Demonstrationsprojekte zu den oben genannten Themen durchgeführt und die Ergebnisse sowie die entwickelten Methoden publiziert. Jedoch lassen sich die publizierten Methoden meist nicht nachbilden bzw. validieren, da die Untersuchungsmodelle oder die angesetzten Szenarien für Dritte nicht nachvollziehbar sind. Es fehlen einheitliche Netzmodelle, die die deutschen NS-Netze abbilden und für Vergleichsuntersuchungen herangezogen werden können, ähnlich dem Beispiel der nordamerikanischen Verteilnetzmodelle des IEEE [1].

Im Gegensatz zum Übertragungsnetz, dessen Struktur hinreichend genau bekannt ist, sind passende Netzmodelle für NS-Netze wegen der hohen Anzahlen der NS-Netze und Verteilnetzbetreiber (VNB) nur schwer abzubilden. Des Weiteren ist eine detaillierte Darstellung realer NS-Netze in wissenschaftlichen Publikationen aus datenschutzrechtlichen Gründen meist nicht erwünscht. Für die Untersuchungen in [2] wurden darum möglichst charakteristische synthetische NS-Netzmodelle erstellt, die sich an gängigen deutschen Siedlungsstrukturen und üblichen Netzplanungsgrundsätzen orientieren. In dieser Arbeit werden diese NS-Netzmodelle sowie ihre Entwicklung im Detail erklärt. Damit stehen erstmals für die Öffentlichkeit nachvollziehbare NS-Netzmodelle für den deutschsprachigen Raum zur Verfügung. Sie können als Benchmark für wissenschaftliche Untersuchungen sowie zur Methodenentwicklung verwendet werden.

## 2 Methodische Vorgehensweise

Die einzelnen Entwicklungsschritte sind in Abbildung 1 aufgeführt. Schritt I beinhaltet die Identifikation von repräsentativen Siedlungsstrukturen mit typischen Gebäuden und Geo-Strukturmerkmalen wie Straßenführung und Grundstücksabmessungen. In Schritt II wurde für jede Siedlungsstruktur ein Gebäudetyp festgelegt mit Geschosszahl, Anzahl der Wohnungen und Gebäudeabmessungen sowie der abgeleiteten nutzbaren Dachflächen. Die Dachflächen sind für die spätere Auslegung von PV-Anlagen relevant. Schritt III beinhaltet die Festlegung der Geo-Strukturmerkmale wie typische Netzstrahllänge, Abstände zwischen Gebäuden und Straßen, Anzahl von Abgängen an der Ortsnetzstation (ONS) und Anzahl von Gebäuden bzw. Hausanschlüssen. Die Festlegungen in den Schritten I bis III beruhen auf einer umfangreichen Literaturrecherche insbesondere von Publikationen aus dem Bauwesen.



In Schritt IV wurden auf der Basis von üblichen Netzplanungsgrundsätzen Leitungstypen, Netztopologien und Verlegearten der Leitungen für die verschiedenen Siedlungsstrukturen festgelegt. Insbesondere in diesem Schritt wurde eng mit einem mittelgroßen deutschen VNB zusammengearbeitet. Im Anschluss an Schritt IV wurde für jede Siedlungsstruktur ein Grundnetzmodell in einem kommerziellen Netzberechnungsprogramm erstellt. Anschließend wurde in Schritt V die Auslegung der Betriebsmittel, d.h. der Transformatoren und der Leitungen festgelegt. Dazu wurden übliche Planungsverfahren für NS-Netze angewandt und die Betriebsmittel aus einem Katalog von Standardbetriebsmittel ausgewählt.

Das Endergebnis sind 14 verschiedene synthetische NS-Netzmodelle mit jeweils drei Varianten bezüglich ihrer geografischen Ausdehnung.

Abbildung 1: Übersicht Entwicklungsschritte

### 3 Entwicklungsschritte

#### I. Identifikation repräsentativer Siedlungsstrukturen

Siedlungen sind „Ansammlungen von Gebäuden, in denen Menschen wohnen, samt den dabei befindlichen, anderen Zwecken dienenden Bauten, Einrichtungen, Verkehrsflächen usw.“<sup>1</sup>. Für bautechnische Untersuchungen wurden in der Vergangenheit bereits von verschiedenen Seiten [3 bis 7] charakteristische Siedlungen mit definierten Strukturmerkmalen zu repräsentativen Siedlungsstrukturen zusammengefasst. In [8] wurden die in [3] vorgestellten Siedlungsstrukturen für netztechnische Untersuchungen modifiziert. Tabelle 1 zeigt die verschiedenen Siedlungsstrukturen aus den jeweiligen Publikationen. Davon ausgehend wurden die repräsentativen Siedlungsstrukturen in diesem Beitrag abgeleitet. Tabelle 2 zeigt die festgelegten Siedlungsstrukturen mit ihren Kurzbezeichnungen und den wesentlichen Eigenschaften. Sie sind zusätzlich unterteilt in ländliche, vorstädtische und städtische Gebiete.

Tabelle 1: Übersicht über Siedlungsstrukturen aus unterschiedlichen Publikationen

	Publikationen					
	[3]	[4]	[5, S. 30]	[6, S. 26]	[7, S. 40]	[8, S. 64]
Streusiedlungen		X	X			X
Dorfkern und Einfamilienhaus-siedlung	X					X
Einfamilienhaussiedlung		X			X	
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	X		X	X		
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppelhäuser			X	X	X	X
Reihenhaussiedlung	X	X	X	X	X	X
Zeilenbebauung mittlere Dichte	X		X	X		X
Blockbebauung	X	X	X	X	X	X
Hochhaus	X	X		X	X	X
Historische Altstadt	X					X
Citybebauung	X					X
Industrie- und Lagergebäude	X					X

Tabelle 2: Übersicht zu den in diesem Beitrag berücksichtigten repräsentativen Siedlungsstrukturen

Gebiet	Bezeichnung der Siedlung	Kurz- Bez.	Eigenschaften
Ländlich	Streusiedlung, Verstreute Einzelhäuser	S1a	Freistehendes Haus, weit entfernt von anderen Gebäuden
	Streusiedlung mit Hauscluster	S1b	Häusergruppe, weit entfernt von anderen Gruppen
	Straßendorf	S2a	Häuser im Zentrum, angeordnet auf einer Linie
	Kreuzdorf	S2b	Häuser im Zentrum, angeordnet als Kreuz
Vorstädtisch	Niederdichte Ein- oder Zweifamilienhäusersiedlung	S3a	Häuser mit niedriger Dichte, meist von einer Familie bewohnt
	Hochdichte Ein- oder Zweifamilienhäusersiedlung	S3b	Häuser mit hoher Dichte, meist von zwei Familien bewohnt
	Doppelhaussiedlung	S4a	Zwei Häuser auf einem Grundstück, die sich eine Wand teilen
	Reihenhaussiedlung	S4b	Reihe identischer Häuser, die sich die Seitenwände teilen
Städtisch	Wohnblocksiedlung/ Zeilenbebauung	S5a	Hohe Gebäude in Reihen angeordnet
	Wohnhochhausbebauung	S5b	Hohe mehrstöckige Gebäude
	Blockbebauung	S6a	Von Straßen umgebenes städtisches Wohngebiet
	Historische Altstadt	S6b	Historische Altstädte, meist entstanden während des Mittelalters

<sup>1</sup> Definition 2 von Siedlung im Duden

## II. Identifikation eines Gebäudetyps je repräsentativer Siedlungsstruktur

Jeder repräsentativen Siedlungsstruktur wird ein Gebäudetyp zugeordnet. Ein Gebäudetyp wird über folgende Parameter definiert:

- 1) Abmessungen der Gebäude
- 2) Geschosshöhe (Etagen)
- 3) Anzahl der Wohnungen
- 4) Typische Dachflächen

Zur Festlegung der Parameter nach Tabelle 3 wurden gerundete Mittelwerte der Angaben in [3 bis 9] verwendet. Wohnungen sind hierbei „nach außen abgeschlossene, zu Wohnzwecken bestimmte, in der Regel zusammen liegende Räume in Wohngebäuden und sonstigen Gebäuden mit Wohnraum, die die Führung eines eigenen Haushalts ermöglichen“<sup>2</sup>. Bei der Entwicklung der NS-Netzmodelle wurde davon ausgegangen, dass in jeder Wohnung ein Haushalt geführt wird.

Je nach Gebäudetyp ergeben sich unterschiedliche nutzbare Dachflächen  $A_{pv}$  zur Installation von PV-Modulen. Zur Berechnung von  $A_{pv}$  wurde eine vereinfachte Gleichung auf Basis der Gebäudeabmessungen verwendet:

$$A_{pv} = \frac{A_{ge}}{\cos(\alpha_{DN})} \cdot 0,5 \cdot f_{DN}, \quad (1)$$

mit  $A_{ge}$  Gebäudegrundfläche,  $\alpha_{DN}$  Dachneigungswinkel und  $f_{DN}$  Dachnutzungsfaktor. Gl. (1) setzt voraus, dass nur eine Seite eines Satteldaches genutzt wird (Faktor 0,5). Der Dachneigungswinkel wurde pauschal bei allen Siedlungsstrukturen auf  $\alpha_{DN} = 30^\circ$  gesetzt. Eine Ausnahme bildet S5b mit einem Flachdach und  $\alpha_{DN} = 0^\circ$ . Mit dem Dachnutzungsfaktor wird berücksichtigt, dass nicht die ganze Fläche mit PV-Modulen abgedeckt werden kann, dieser wurde ebenfalls pauschal auf  $f_{DN} = 0,85$  festgelegt.

Tabelle 3: Parameter zu den Gebäudetypen

Gebäudetyp		Gebäudeabmessung	Geschosshöhe	Anzahl Wohnungen	Nutzbare Dachfläche $A_{pv}$
S1a	Einlieger	18 m x 10 m	1	1	88,33 m <sup>2</sup>
S1b		18 m x 10 m	1	1	88,33 m <sup>2</sup>
S2a	Bungalow	10 m x 16 m	1	1	78,52 m <sup>2</sup>
S2b		10 m x 16 m	1	1	78,52 m <sup>2</sup>
S3a	Siedlerhaus	10 m x 12,5 m	1,25	1	61,34 m <sup>2</sup>
S3b	Zweifamilienhaus	10 m x 12 m	2	2	58,89 m <sup>2</sup>
S4a	Reihenhaus	7,5 m x 10,7 m	2	1	39,26 m <sup>2</sup>
S4b		5,5 m x 10 m	2	1	26,99 m <sup>2</sup>
S5a	Scheibenhaus	10 m x 24 m	5	10	117,78 m <sup>2</sup>
S5b	Punkthaus	20 m x 24 m	12	48	204,00 m <sup>2</sup>
S6a	Blockbebauungshaus	120 m x 140 m*	4	8	147,22 m <sup>2</sup> *
S6b		60 m x 100 m*	3	6	122,69 m <sup>2</sup> *

\*mittlere Gebäudeabmessung

## III. Identifikation der Geo-Strukturmerkmalen der repräsentativen Siedlungsstrukturen

Die Festlegung von Geo-Strukturmerkmalen ist zur Bestimmung der Leitungslängen und der Größe der NS-Netzmodelle notwendig und beruht auf folgenden Gesichtspunkten:

- 1) Identifikation typischer Netzgrößen (-ausdehnungen) und Netzstranglängen für jede Siedlungsstruktur
- 2) Geo-Strukturabmessungen (Abstand zwischen zwei Gebäuden usw.)
- 3) Anzahl der Abgänge an der Ortsnetzstation
- 4) Anzahl Gebäude/Hausanschlüsse

<sup>2</sup> Definition nach: [www.statistik.sachsen.de/download/010\\_GB-Wohnen/F\\_1\\_Def.pdf](http://www.statistik.sachsen.de/download/010_GB-Wohnen/F_1_Def.pdf), abgerufen am 12.02.2018

Typische Netzstranglängen wurden als Mittelwert aus verschiedenen Publikationen [8, 10] und in Abstimmung mit einem VNB festgelegt (siehe Tabelle 4). Für die Siedlungsstrukturen S5a und S5b wurden keine Angaben über typische Netzstranglängen gemacht, da es sich bei diesen um Siedlungen bzw. Siedlungsteile mit eingepprägter Geo-Struktur und Knotenanzahl handelt. Die Netzstrahlängen ergeben sich aus hier aus den Grundstücksabmessungen.

Als Grundlage für die Festlegung der Geo-Strukturabmessungen wurde die Geschossflächenzahl (GFZ) verwendet. Die GFZ ist Bestandteil des Bebauungsplanes und gibt an, wie viele Quadratmeter Geschossfläche  $A_{ge}$  pro Quadratmeter Grundstück  $A_{gr}$  errichtet werden dürfen. Die GFZ ergibt sich damit zu [11]:

$$GFZ = \frac{A_{ge}}{A_{gr}} \quad (2)$$

Aufgrund der unterschiedlichen Angaben zur GFZ je Siedlungsstruktur in den verschiedenen Publikationen [3, 4, 6 bis 8] wurden drei Szenarien für die GFZ jeder Siedlungsstruktur berücksichtigt: Ein maximales- (max), ein mittleres- (mit) und ein minimales- (min) Szenario der resultierenden geografischen Ausdehnung der Siedlung. Dabei wurden aus der Literatur [3 bis 8] jeweils die Extremwerte je Siedlungsstruktur für das min- und max-Szenario sowie ein mittlerer Wert für das mit-Szenario verwendet.

Mit der GFZ und den Gebäudeabmessungen aus Schritt zwei (Tabelle 3) wurden die Grundstücksabmessungen und mit den Grundstücksabmessungen der Abstand zwischen zwei Gebäuden bestimmt, siehe Tabelle 4. Ein großer GFZ-Wert hat einen kleineren Abstand zwischen zwei Gebäuden zur Folge.

Spezialfälle bilden die Siedlungsstrukturen S1a und S1b, da es sich hierbei um Streusiedlungen handelt. Der Wert für die Entfernung zwischen zwei Gebäuden (S1a) bzw. zwischen zwei Hausclustern (S1b) wurde nach Literaturrecherche auf  $75 \text{ m} \pm 25 \text{ m}$  festgelegt.

Der Abstand zwischen Gebäude und Straße wurde in Absprache mit dem VNB unter Berücksichtigung der GFZ auf die in Tabelle 4 angegebenen Werte festgelegt. Die Breite der Straßen und Wege orientieren sich an den Angaben in [8, S. 30].

Tabelle 4: Übersicht zu den Geo-Strukturmerkmalen

	Mittlere Netzstranglänge	GFZ			Abstand benachbarter Hausanschlüsse in m		Abstand zwischen Gebäude und Straße in m				Bereite der Straße/ Weg in m	
		max	mit	min	min	mit	max	min	mit	max	Str.	Weg
S1a	600 m	0,30	0,20	0,05	50	75	100	10	15	20	12,5	-
S1b	500 m	0,30	0,20	0,05	50	75	100	10	15	20	12,5	-
S2a	450 m	0,50	0,35	0,20	15	22,5	30	2	4	6	12,5	-
S2b	270 m	0,50	0,35	0,20	15	22,5	30	2	4	6	12,5	-
S3a	452 m	0,30	0,20	0,10	12	16	20	4	6	8	10	6
S3b	415 m	0,50	0,35	0,20	15	22,5	30	4	6	8	10	6
S4a	477,5 m	0,50	0,35	0,20	12	15,3	19	4	6	8	10	6
S4b	222,5 m	0,80	0,60	0,40	5,5	7,5	10,7	4	6	8	10	6
S5a	*	1,20	0,80	0,40	24	24	24	4	6	8	15	6
S5b	*	1,50	1,00	0,50	60	72	96	5	20	35	15	-
S6a	195 m	1,47	1,01	0,78	20	30	40	2	4	6	15	-
S6b	166 m	2,60	2,11	1,79	10	12,5	15	2	4	6	12,5	-

\*Siedlungstypen mit eingepprägter Struktur

Abbildung 2 zeigt eine grafische Darstellung der Gebäude- und Grundstücksabmessungen je Abmessungs-Szenario. Bei gleichbleibender Abmessung der Gebäude werden die Grundstücksabmessungen bei Veränderung der GFZ angepasst. Eine Ausnahme bilden die Siedlungsstrukturen S6a und S6b, hier sind die Gebäudeabmessungen nahezu gleich den Grundstücksabmessungen. Mit sinkender GFZ steigen die Abmessungen der Gebäude- und Grundstücke sowie die nutzbare Dachfläche proportional zueinander an.

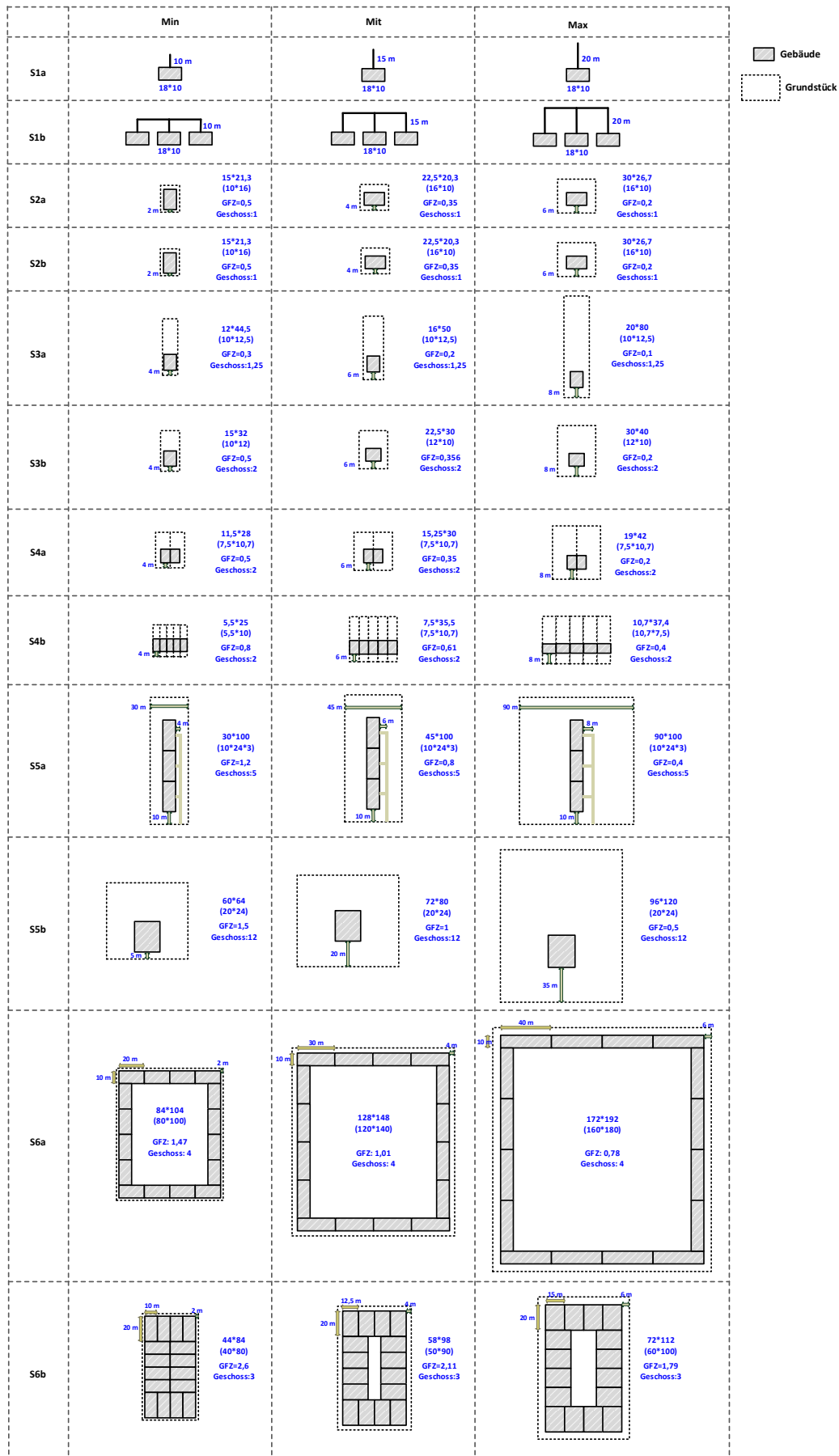


Abbildung 2: Grafische Darstellung der Gebäude- und Grundstücksabmessungen je Abmessungs-Szenario

Die Anzahl von Abgängen an der ONS (Anzahl Netzstränge) hängt auch von den Netzplanungsgrundsätzen des VNB ab. Dazu wurde die Anzahl der Netzstränge anhand von Geo-Strukturmerkmalen (z. B. Straßen) typischer Netzgrößen sowie aus den Angaben in [8, 10] festgelegt (siehe Tabelle 5). Für einige Siedlungsstrukturen (S3a, S3b und S4a) wurde die Anzahl der Netzstränge nach der Auslegung der Netzkomponenten unter der Verwendung üblicher Netzplanungsgrundsätze geändert (Änderung von einseitige auf zweiseitige Kabelverlegung), um Netzplanungskriterien einzuhalten.

Aus der typischen Netzstranglänge  $l_{\text{netz}}$  aus Tabelle 4 und dem durchschnittlichen Wert (mit-Szenario) der Grundstücksabmessungen längs des Netzstrangs  $l_{\text{gr}}$  ergibt sich die Anzahl der Gebäude (gleich der Anzahl der Hausanschlüsse) je Netzstrang  $N_{\text{ge,netz}}$ . Die Anzahl der Gebäude wurde mit Gleichung (3) berechnet. Der Faktor  $k$  dient als Multiplikator, wenn ein Netzstrang Häuser auf beiden Straßenseiten ( $k = 2$ ) oder nur Häuser auf einer Straßenseite ( $k = 1$ ) versorgt.

$$N_{\text{ge,netz}} = k \cdot \frac{l_{\text{netz}}}{l_{\text{gr}}} \quad (3)$$

Die Anzahl der Wohnungen je Siedlungsstruktur ergibt sich dann aus der Anzahl der Wohnungen der Gebäudetypen aus Tabelle 3 multipliziert mit der Anzahl der Gebäude. Die Anzahl der Wohnungen ist entscheidend für die Belastungsannahmen bei der Auslegung der Netzkomponenten. Tabelle 5 zeigt alle Angaben zur Anzahl der Gebäude und Wohnungen je Netzstrang. Die Anzahl der Gebäude wurden für die Abmessungs-Szenarien (min/mit/max) festgehalten, während die Netzstrahllängen für das min-Szenario ab- und für das max-Szenario zunehmen.

Tabelle 5: Anzahl der Gebäude und Wohnungen je Netzstrang

	Anzahl Netzstränge	$k$	Gebäude je Netzstrang $N_{\text{ge,netz}}$ *	Anzahl Gebäude $N_{\text{ge}}$	Anzahl Wohnungen $N_{\text{W}}$
S1a	1	2	18	18	18
S1b	1	2	30	30	30
S2a	2*	2	40	80	80
S2b	4	2	25	100	100
S3a	6	1	27	162	162
S3b	6	1	18	108	216
S4a	6	1	30	180	180
S4b	3	2	60	180	180
S5a	4	1	4	24	240
S5b	6	1	1	6	288
S6a	6	1	6	32	256
S6b	6	1	8	48	288

\*Doppelte Anzahl von Netzsträngen bei Freileitungsvariante

#### IV. Verwendung von üblichen Netzplanungsgrundsätzen

Netzplanungsgrundsätze werden i.d.R. von jedem VNB individuell festgelegt. Diese sollen den Netzplanern mit standardisierten Vorgehensweisen unterstützen. Sie umfassen i.d.R. die folgenden Schritte:

- 1) Auswahl der Netztopologie
- 2) Auswahl des Leitungstyps
- 3) Auswahl der Verlegeart der Leitungen
- 4) Verwendung von Standardbetriebsmittel

Nach [12] gibt es drei mögliche Varianten an Grundtopologien für NS-Netze:

- Strahlennetz
- Ringnetz
- Maschennetz

Das Strahlennetz ist die etablierte Grundtopologie von NS-Netzen, insbesondere in ländlichen Gebieten. Es existieren auch Sonderformen des Strahlennetzes, wie das Strahlennetz mit partieller Doppelverlegung, diese wurden jedoch nicht berücksichtigt. Ringnetze werden i.d.R. mit offenen Ringen betrieben, d.h. die Ringe sind an jeweils einer Trennstelle aufgetrennt. Ringnetze mit offenen Ringen können wie Strahlennetze behandelt werden und wurden daher nicht gesondert berücksichtigt. Maschennetze werden in dichtbesiedelten Gebieten verwendet. Auf-

grund zu kleiner Lastdichte (S1a-S3a) oder zu kleiner Ausdehnung des Netzes (S3b-S6b) wurde auch das Maschennetz nicht berücksichtigt. Somit wurde für alle NS-Netzmodelle als standardmäßige Ausführungsform das Strahlennetz als Netztopologie verwendet.

Es gibt zwei Varianten für Leitungstypen:

- Freileitung (FL)
- (Erd-)Kabel (KB)

Freileitungen werden in Deutschland i.d.R. in ländlichen Gebieten mit geringer Lastdichte eingesetzt. In vorstädtischen und städtischen Gebieten werden i.d.R. Kabel verwendet. Durch das unterschiedliche Reaktanz-zu-Resistanz-Verhältnis ist die Unterscheidung dieser Leitungstypen bei der Erstellung der synthetischen NS-Netzmodelle relevant. Bis auf die Siedlungsstrukturen S1a und S1b wurde bei allen anderen Siedlungsstrukturen Kabel als Leitungstyp verwendet. Bei den Siedlungsstrukturen S2a und S3a wurden auch Freileitungen als zusätzliche Variante berücksichtigt.

Hinsichtlich der Kabel-Verlegeart gibt es zwei grundlegende Varianten:

- Einseitige Kabelverlegung
- Zweiseitige Kabelverlegung

Bei einseitiger Kabelverlegung wird das Kabel auf einer Straßenseite verlegt. Die Hausanschlüsse für die Häuser der anderen Straßenseite werden quer unter der Straße verlegt. Ist auf dieser Straßenseite ein neuer Hausanschluss erforderlich, werden Tiefbauarbeiten an der Straße notwendig. Daher bevorzugen die VNB bei hoher Lastdichte die zweiseitige Kabelverlegung. Bei den hier beschriebenen NS-Netzmodellen wurde zunächst von einer einseitigen Kabelverlegung ausgegangen. In einigen Fällen (S3a, S3b, S4a) konnten bei ausschließlicher Berücksichtigung von Standardkabeln die Planungskriterien nicht eingehalten (siehe Schritt V: Auslegung der Netzkomponenten), wodurch in diesen Fällen die Verlegeart auf zweiseitige Kabelverlegung geändert wurde.

Bei der Verlegeart von Freileitungen gibt es ebenfalls zwei Varianten.

- Einseitige Mastführung
- Zweiseitige Dachständerführung

Zum einen können die Häuser auf beiden Seiten der Straße durch Strommasten auf einer Straßenseite versorgt werden, mit Querverbindung zur anderen Straßenseite. Zum anderen können die Freileitungen über Dachständer geführt werden, mit paralleler Ausführung auf beiden Straßenseiten. Abbildung 3 zeigt jeweils ein Beispiel. Die Variante mit den Dachständern ist die günstigere Variante, setzt aber eine ausreichende räumliche Nähe der Gebäude voraus. Diese Variante wurde bei den Siedlungsstrukturen S2a und S3a verwendet. Für die Streusiedlungen S1a und S1b wurde die Variante mit einseitiger Mastführung verwendet. Tabelle 6 zeigt die Festlegungen hinsichtlich der Netzplanungsgrundsätze je Siedlungsstruktur.



Abbildung 3: Beispiele für die zwei Varianten der Verlegeart von Freileitungen<sup>3</sup>  
(links: Strommast, rechts: Dachständer)

<sup>3</sup> Quelle: <http://www.trafoturm.eu/deutschland/bayern/oberbayern/erding/isen/>, zuletzt aufgerufen am 12.02.2018

Tabelle 6: Verwendete Netzplanungsgrundsätze

	Leitungstyp	Netztopologie	Verlegeart
S1a	FL	Strahlennetz	Strommast
S1b	FL	Strahlennetz	Strommast
S2a	KB & FL	Strahlennetz	einseitige Kabelverlegung & Dachständer
S2b	KB	Strahlennetz	einseitige Kabelverlegung
S3a	KB & FL	Strahlennetz	zweiseitige Kabelverlegung & Dachständer
S3b	KB	Strahlennetz	zweiseitige Kabelverlegung
S4a	KB	Strahlennetz	zweiseitige Kabelverlegung
S4b	KB	Strahlennetz	einseitige Kabelverlegung
S5a	KB	Strahlennetz	einseitige Kabelverlegung
S5b	KB	Strahlennetz	einseitige Kabelverlegung
S6a	KB	Strahlennetz	einseitige Kabelverlegung
S6b	KB	Strahlennetz	einseitige Kabelverlegung

Nach der Festlegung der Netzplanungsgrundsätze konnten Grundnetzmodellen der NS-Netze in einem Netzrechnungsprogramm implementiert werden. Abbildung 4 zeigt eine grafische Darstellung der Entwicklungsschritte am Beispiel der Siedlungsstruktur S3a. Nach der Auslegung der Netzkomponenten und der Einstellung der daraus resultierenden Parameter im Netzrechnungsprogramm ergeben sich die NS-Netzmodelle.

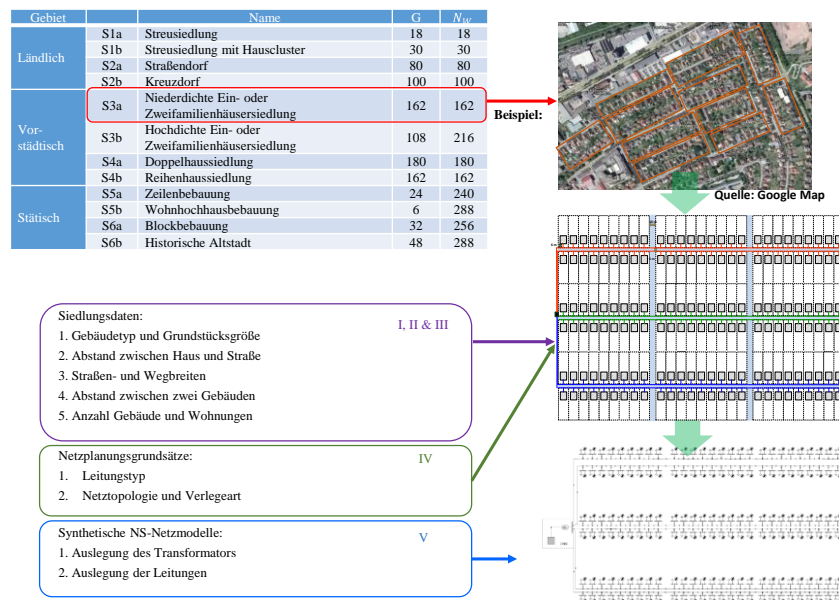


Abbildung 4: Beispiel zur Darstellung der Entwicklungsschritte

## V. Auslegung der Netzkomponenten

Die Auslegung der Netzkomponente erfolgte über die Arbeitsschritte a)-h) nach üblichen Netzplanungsverfahren in enger Abstimmung mit dem VNB. Die Arbeitsschritte sind wie folgt:

- Abhängen einer minimalen Bemessungsleistung des Ortsnetztransformators (ONT) unter Berücksichtigung einer Gleichzeitigkeit bei der Belastungsannahme.
- Auswahl des Typs und der Bemessungsleistung des ONT aus einem Katalog mit Standardbetriebsmittel und Einstellen der Auswahl im Netzrechnungsprogramm.
- Standardbetriebsmitteltypen für die Leitungen mit dem kleinsten Querschnitt im Netzrechnungsprogramm einstellen.
- Einstellen einer Leistung (Belastungsannahme) je Hausanschluss unter Berücksichtigung der Spitzenlast und eines Multiplikators zur Gleichzeitigkeit.
- Durchführung der Lastflussrechnung.
- Ermittlung der Strombelastung der Leitungen. Bei Überlastung größeren Leitungsquerschnitt wählen und im Netzrechnungsprogramm einstellen.
- Durchführung einer erneuten Lastflussrechnung.
- Prüfen der Einhaltung der Strombelastbarkeit sowie eines zulässigen Spannungsabfalls ( $< 5 \% U_n$ ). Bei Nichteinhaltung Leitung verstärken und Arbeitsschritte f) bis h) wiederholen.



Für Arbeitsschritt a) wurde ein Multiplikator  $M(N_W, EG)$  in Abhängigkeit des gewählten Elektrifizierungsgrads (EG) und der Anzahl der Wohnungen im Netzmodell nach [13, S. 35] bestimmt:

$$M(N_W, EG) = 1 + \frac{\alpha(EG)}{N_W^\kappa} = 1 + \frac{13,3}{N_W}, \quad (4)$$

mit  $\alpha(EG)$  und  $\kappa$  als von regionalen Bedingungen abhängigen Koeffizienten. Ohne genaue Informationen über die regionalen Bedingungen können Standardwerte aus der Literatur verwendet werden mit  $\kappa = 1$  und  $\alpha(EG) = 13,3$  bei einem Elektrifizierungsgrad von EG3 [13, S. 35]. Der Elektrifizierungsgrad klassifiziert Wohnungen nach deren Ausrüstung mit elektrischen Geräten. Die vier gängigen Elektrifizierungsgrade sind in Tabelle 7 angegeben [12, S. 2–3, 13, S. 36, 13]. Die dort angegebene Spitzenlast wird in den seltensten Fällen erreicht und es wäre unwirtschaftlich das NS-Netz für diese Leistung auszulegen. Unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit auf Basis von Erfahrungswerten kann jeder Wohnung ein Spitzenlastanteil zugeordnet werden. In Tabelle 7 sind Erfahrungswerte des Spitzenlastanteils  $P_{G\infty}$  für eine sehr hohe Anzahl an Wohnungen ( $>1000$ ) aufgelistet. Je weniger Wohnungen in einem NS-Netz vorhanden sind, desto größer muss die Gleichzeitigkeit des Leistungsbezugs gewählt werden. Ein Netz-spezifischer Spitzenlastanteil  $P_G$  ergibt sich durch die Multiplikation von  $P_{G\infty}$  mit dem Multiplikator nach:

$$P_G = P_{G\infty} \cdot M(N_W, EG). \quad (5)$$

Zur Erstellung der synthetischen NS-Netzmodelle wurde ein Spitzenlastanteil  $P_{G\infty}$  für den EG3 von 2 kW/Wohnung festgelegt.

Tabelle 7: Elektrifizierungsgrad und Spitzenlast für Wohnungen [12, S. 2–3, 13, S. 36, 13]

EG	Beschreibung	Spitzenlastanteil $P_{G\infty}$ für $N_W \rightarrow \infty$
EG1	Licht und Kleingeräte	0,7 ... 0,9 kW/Wohnung
EG2	EG1 + elektrisches Kochen	1,0 ... 1,2 kW/Wohnung
EG3	EG2 +el. Warmwasserbereitung	1,8 ... 2,0 kW/Wohnung
EG4	EG3 + elektrische Heizung	10 ... 12 kW/Wohnung

Zur Abschätzung einer minimalen Bemessungsleistung des ONT wurden die spezifischen Spitzenlastanteile der Wohnungen im NS-Netz aufsummiert:

$$R_\Sigma(N_W) = N_W \cdot P_G. \quad (6)$$

Daraus ergibt sich die minimale Bemessungsleistung des ONT nach:

$$S_{rT, \min} = \frac{R_\Sigma(N_W)}{\cos(\varphi)}. \quad (7)$$

Der anzusetzende Wert für  $\cos(\varphi)$  variiert je nach VNB zwischen  $\cos(\varphi)=0,95 \dots 1$ . Zur Erstellung der synthetischen NS-Netzmodelle wurde basierend auf Erfahrungswerten und in Absprache mit dem VNB ein  $\cos(\varphi)=0,99$  festgelegt. Tabelle 8 zeigt die berechneten Werte je Siedlungsstruktur für die spezifischen Spitzenlastanteile  $P_G$  und minimale Bemessungsleistung des ONT  $S_{rT, \min}$ .

Tabelle 8: Berechnete minimale Bemessungsleistung des ONT und Spitzenlastanteil je Wohnung

	Wohnungen $N_w$	Spezifischer Spitzenlastanteil $P_G$	Minimale Bemessungsleistung des ONT $S_{rT,min}$
S1a	18	3,478 kW	63,2 kVA
S1b	30	2,887 kW	87,5 kVA
S2a	80	2,333 kW	188,5 kVA
S2b	100	2,266 kW	228,9 kVA
S3a	162	2,164 kW	354,1 kVA
S3b	216	2,123 kW	463,2 kVA
S4a	180	2,148 kW	390,5 kVA
S4b	180	2,148 kW	390,5 kVA
S5a	240	2,111 kW	511,7 kVA
S5b	288	2,092 kW	608,7 kVA
S6a	256	2,104 kW	544,0 kVA
S6b	288	2,092 kW	608,7 kVA

Basierend auf den Werten aus Tabelle 8 wurden in den nächsten Arbeitsschritten die Ortsnetztransformatoren mit der nächst größeren Bemessungsleistung aus einem Katalog von Standardbetriebsmitteln (siehe Tabelle 9) ausgewählt und im Netzberechnungsprogramm eingestellt. Auch Leitungen wurden aus einem Katalog mit Standardbetriebsmitteln (siehe Tabelle 10) ausgewählt und eingestellt, jeweils mit dem zunächst kleineren Querschnitt.

Tabelle 9: Katalog mit Standardbetriebsmitteln der Ortsnetztransformatoren

Spannung	$S_{rT}$	$u_k$	$u_r$	$X_0/X_1$	$R_0/R_1$
20 kV / 0,4 kV	100 kVA	4 %	1 %	1	1
20 kV / 0,4 kV	250 kVA	4 %	1 %	1	1
10 kV / 0,4 kV	400 kVA	4 %	1 %	1	1
10 kV / 0,4 kV	630 kVA	4 %	1 %	1	1
10 kV / 0,4 kV	800 kVA	6 %	1 %	1	1

Tabelle 10: Katalog mit Standardbetriebsmitteln der Leitungen

Typ & Material	Querschnitt	Reaktanzbelag	Resistenzbelag	$X_0/X_1$	$R_0/R_1$	Thermischer Grenzstrom
FL-AL	4x25 mm <sup>2</sup>	0,3988 Ω/km	1,2554 Ω/km	4	4	135 A
FL-AL	4x 70 mm <sup>2</sup>	0,3667 Ω/km	0,4626 Ω/km	4	4	255 A
FL-AL	4x 95 mm <sup>2</sup>	0,3557 Ω/km	0,3264 Ω/km	4	4	320 A
KB NAYY	4x 35 mm <sup>2</sup>	0,086 Ω/km	0,868 Ω/km	4,13	4	123 A
KB NAYY	4x 50 mm <sup>2</sup>	0,085 Ω/km	0,641 Ω/km	3,76	4	144 A
KB NAYY	4x 150 mm <sup>2</sup>	0,08 Ω/km	0,206 Ω/km	3,64	4	275 A
KB NAYY	4x 240 mm <sup>2</sup>	0,08 Ω/km	0,164 Ω/km	3,67	4	313 A

Anschließend wurde eine Belastungsannahme je Gebäude bzw. Hausanschluss eingestellt, die sich aus der Multiplikation des spezifischen Spitzenlastanteils je Wohnung aus Tabelle 8 mit der Anzahl der Wohnungen pro Gebäude aus Tabelle 3 ergibt. Mit einer Lastflussrechnung wurde die Strombelastung der Leitungen hinsichtlich der Einhaltung des thermischen Grenzstroms geprüft. Bei Überlastung wurde ein größerer Querschnitt unter Berücksichtigung von Tabelle 10 gewählt. Nach einer erneuten Lastflussrechnung wurde erneut die Einhaltung der Strombelastbarkeit sowie eines zulässigen Spannungsabfalls geprüft, bei nicht-Einhaltung wurde die Leitung verstärkt und die Arbeitsschritte f) bis h) wiederholt. Das Netzplanungskriterium für den zulässigen Spannungsfall ist abhängig von der Aufteilung des Spannungsbandes über die Netzebenen durch den VNB. Übliche Werte liegen zwischen 5 %  $U_n$  [14] und 5,75 %  $U_n$  [15] Spannungsdifferenz zwischen der Spannung an der Sammelschiene am ONT und der niedrigsten Spannung im NS-Netz. Zur Erstellung der synthetischen NS-Netzmodelle wurde ein zulässiger Spannungsabfall von 5 %  $U_n$  verwendet. Die Auslegung der Leitungen erfolgte für das mit-Szenario. Im max-Szenario, mit höheren Netzstrahlängen, kann auch ein höherer Spannungsabfall auftreten.

Tabelle 11 zeigt das Ergebnis der Auslegung der Netzkomponenten.

Tabelle 11: Ausgewählte Netzkomponenten

	Spannung	Bemessungsleistung ONT $S_{rT}$ in kVA	Freileitung	Kabel	Hausanschluss
S1a	20 kV / 0,4 kV	100	FL 4x95	-	FL 4x25
S1b		100	2x FL 4x70	-	FL 4x25
S2a		250	FL 4x70	-	FL 4x25
		250	-	NAYY 4x150	NAYY 4x35
S2b		250	-	NAYY 4x150	NAYY 4x35
		400	FL 4x95	-	FL 4x25
S3a	10 kV / 0,4 kV	400	-	NAYY 4x150	NAYY 4x35
S3b		630	-	NAYY 4x150	NAYY 4x35
S4a		400	-	NAYY 4x150	NAYY 4x35
S4b		400	-	NAYY 4x150	NAYY 4x35
S5a		630	-	NAYY 4x150	NAYY 4x35
S5b		630	-	NAYY 4x150	NAYY 4x35
S6a		630	-	NAYY 4x150	NAYY 4x35
S6b		630	-	NAYY 4x150	NAYY 4x35

Die Netzkomponenten der synthetischen NS-Netzmodelle wurden dimensioniert, um den Status quo von NS-Netzen abzubilden, d.h. NS-Netze die in den 1970er und 1980er gebaut wurden. Heute wird bei der Netzplanung von NS-Netzen auch die Netzverträglichkeit von Erzeugungsanlagen geprüft. Nach den Angaben in der VDE-AR 4105 darf die von Erzeugungsanlagen im NS-Netz hervorgerufene Spannungsänderung an keinem Punkt im Netz 3 %  $U_n$  überschreiten. Der VNB kann von diesem Wert abweichen wenn entsprechende Maßnahmen getroffen werden, z. B. Einsatz eines regelbaren Ortsnetztransformators.

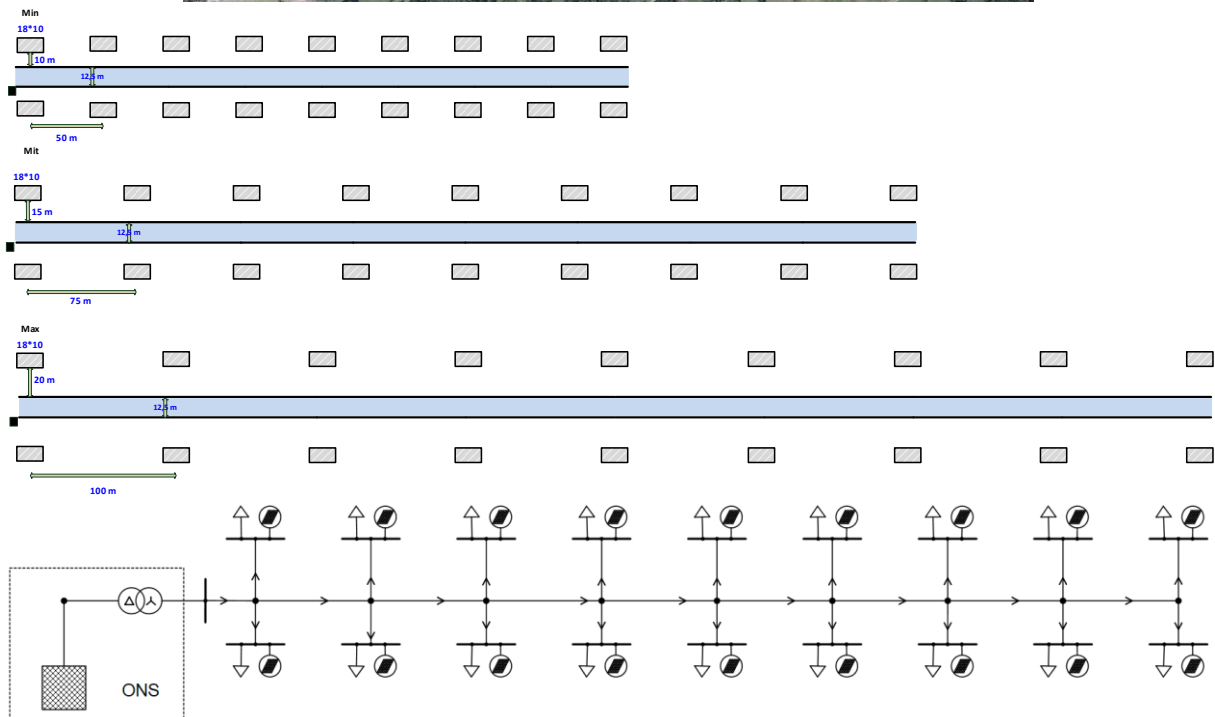
Des Weiteren ist an dieser Stelle anzumerken, dass viele VNBs bei heutiger Netzplanung einen weitaus höheren Spitzenlastanteil  $P_{G\infty}$  für die Berechnung der Belastungsannahmen ansetzen (z. B. 3,5 kW), um die zukünftige Elektrifizierung von Fahrzeugen zu berücksichtigen.

#### 4 Synthetische NS-Netzmodelle

Nachfolgend werden die fertigen synthetischen NS-Netzmodelle vorgestellt. Gezeigt werden jeweils ein Ausschnitt aus dem Online-Kartendienst „Google Maps“ als reales Beispiel einer Siedlung, ein Netzstrukturplan, ein Ausschnitt aus dem Netzberechnungsprogramm „PSS®Sincal“ und einige Kerndaten zum NS-Netzmodell. Für die Siedlungsstrukturen S1a-S2b und S5a-S6b werden die Netzstrukturpläne für das min-, mit- und max-Szenario angegeben, für alle anderen wird lediglich das mit-Szenario gezeigt.

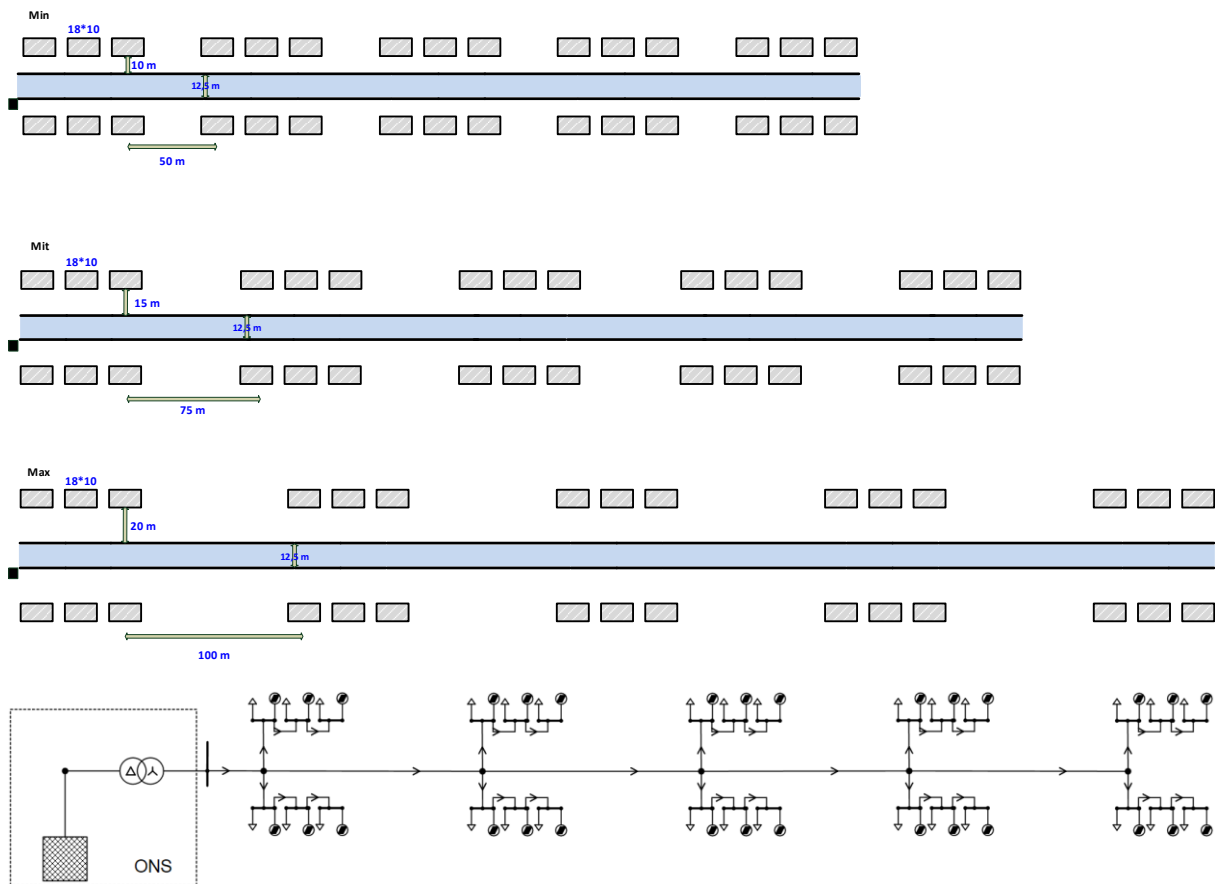
Jedes Gebäude bzw. jeder Hausanschluss im NS-Netzmodell wurde im Netzberechnungsprogramm mit einer Last und einer Erzeugungsanlage ausgeführt. Einzelne Erzeugungsanlagen können jedoch zur Untersuchung verschiedener Szenarien außer Betrieb genommen werden.

## S1a Streusiedlung



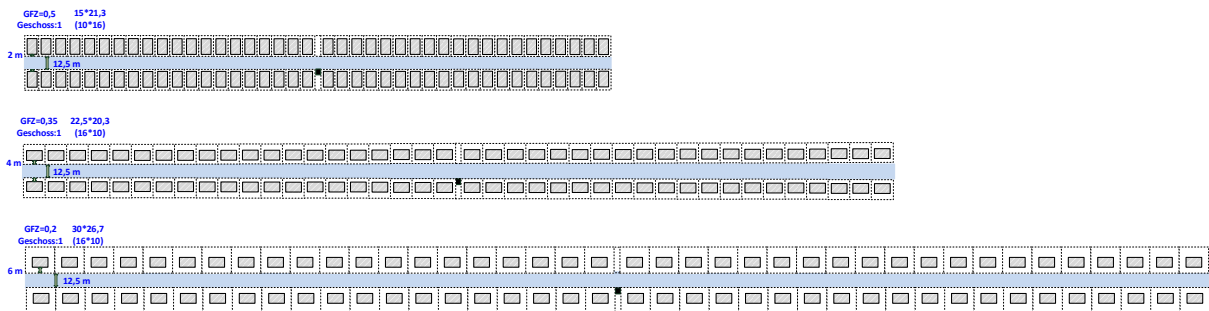
	$S_{iT}$	Leitungstyp	$N_{ge}$	$N_w$
S1a	100 kVA	FL	18	18

## S1b Streusiedlung mit Hauscluster

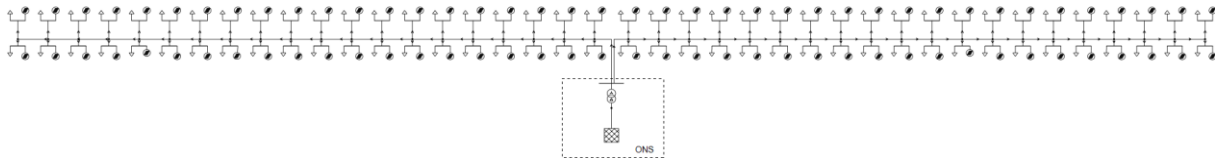


	$S_{rT}$	Leitungstyp	$N_{ge}$	$N_w$
S1b	100 kVA	FL	30	30

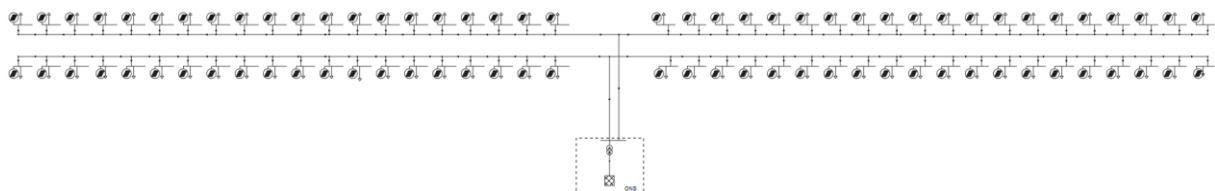
## S2a Straßendorf



## KB



## FL

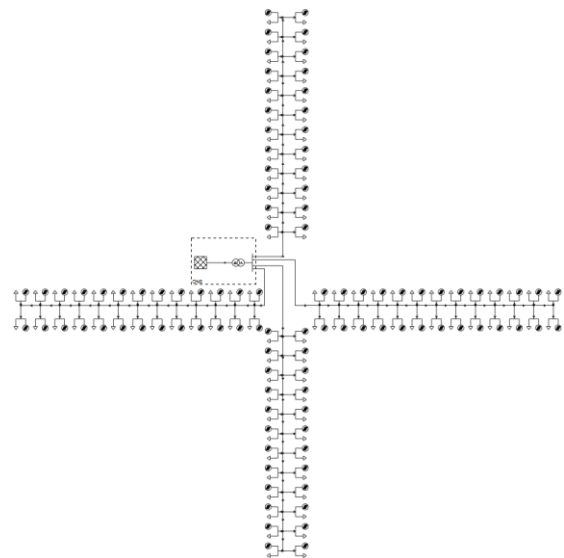
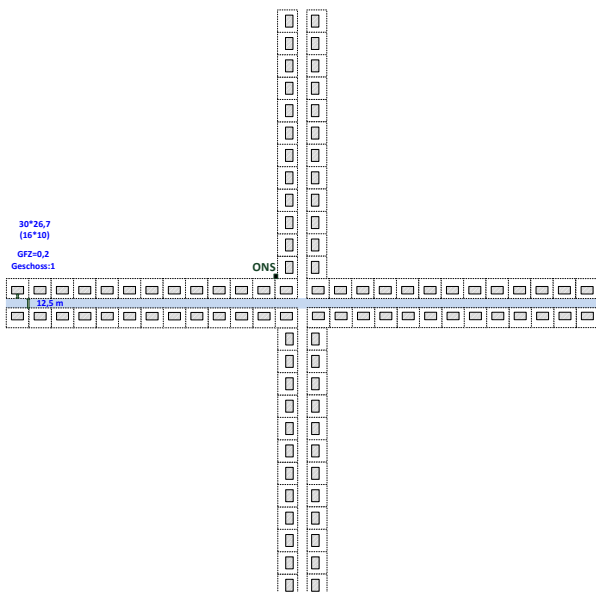
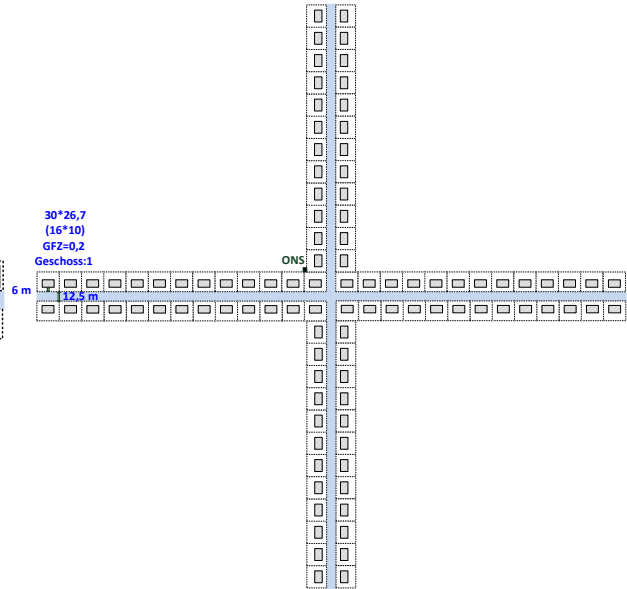
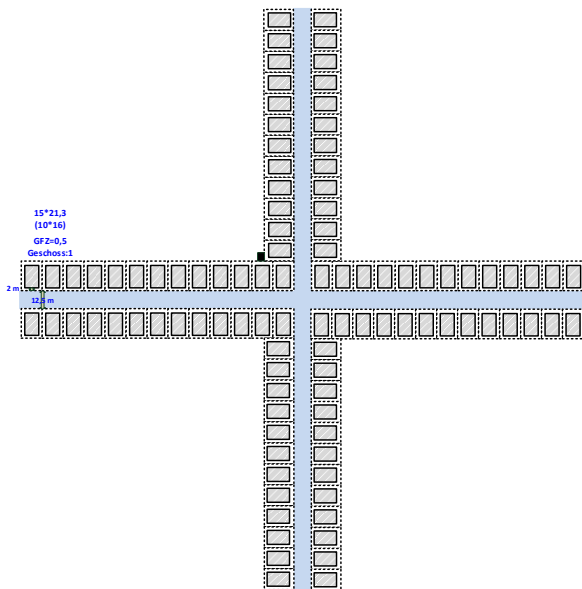


	$S_{rT}$	Leitungstyp	$N_{ge}$	$N_W$
S2a	250 kVA	KB & FL	80	80

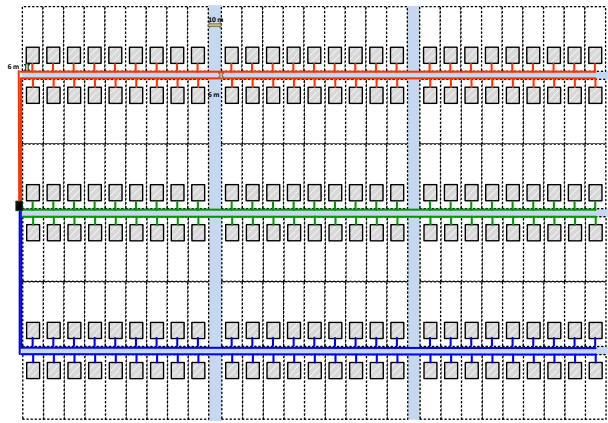
## S2b Kreuzdorf



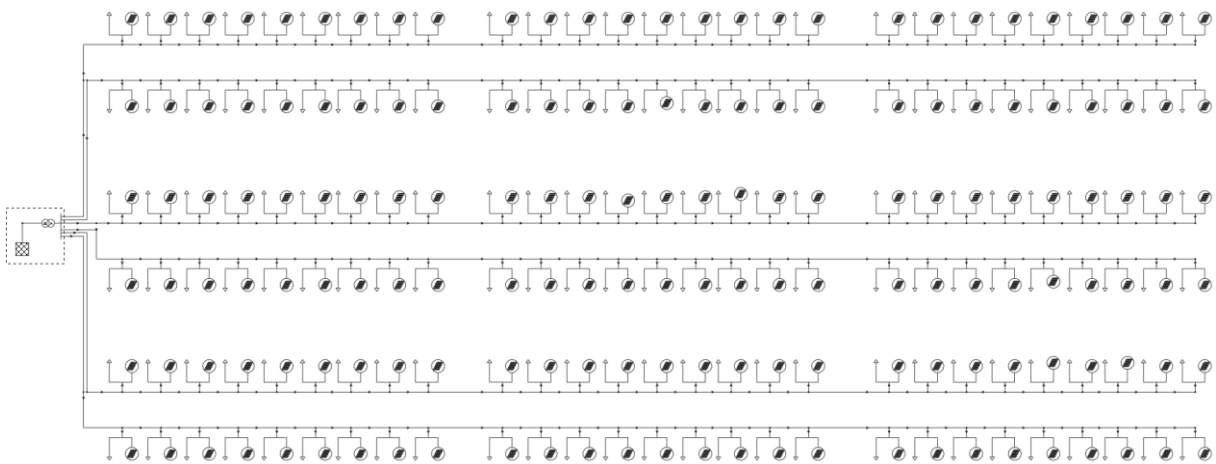
	S2b
$S_{TT}$	250 kVA
Leitungstyp	KB
$N_{ge}$	100
$N_W$	100



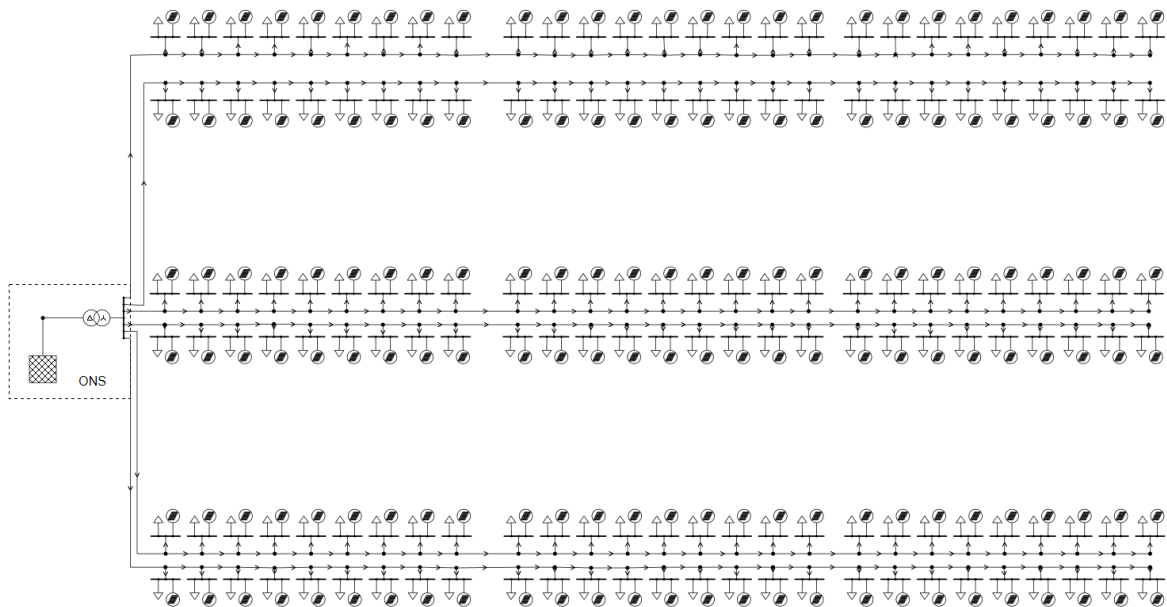
### S3a Niederdichte Ein- oder Zweifamilienhäusersiedlung



#### KB



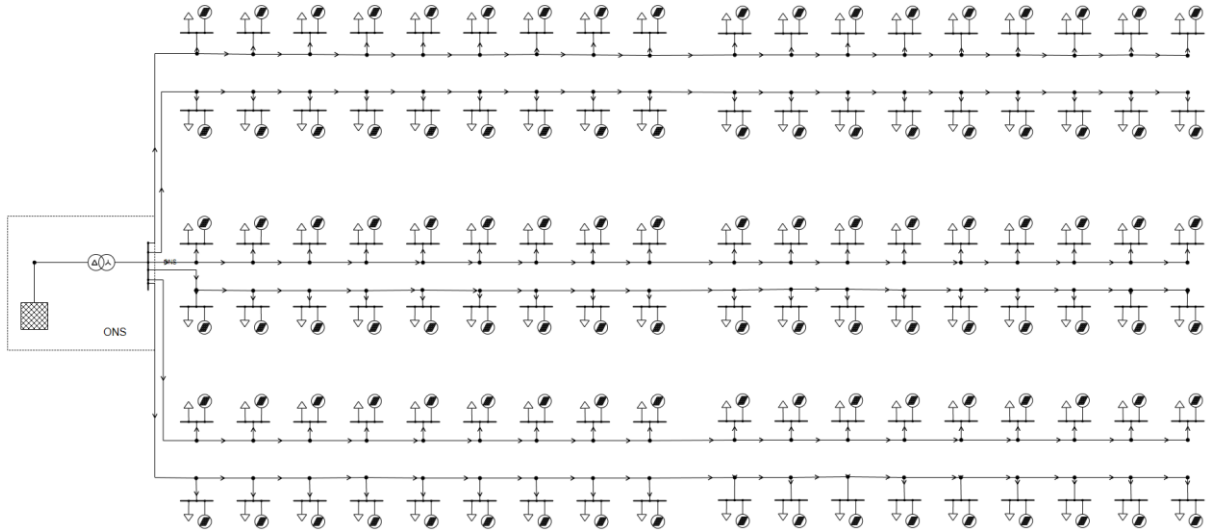
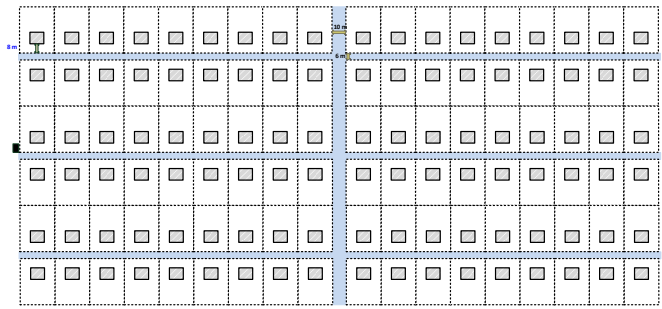
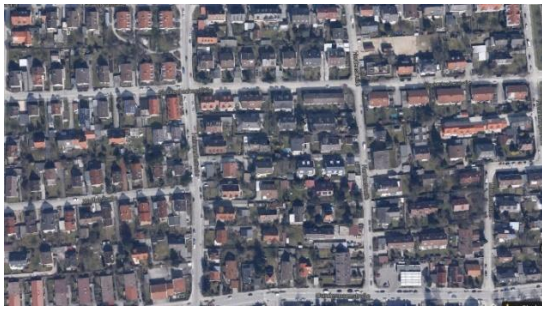
#### FL



	$S_{iT}$	Leitungstyp	$N_{ge}$	$N_w$
S3a	400 kVA	KB & FL	162	162

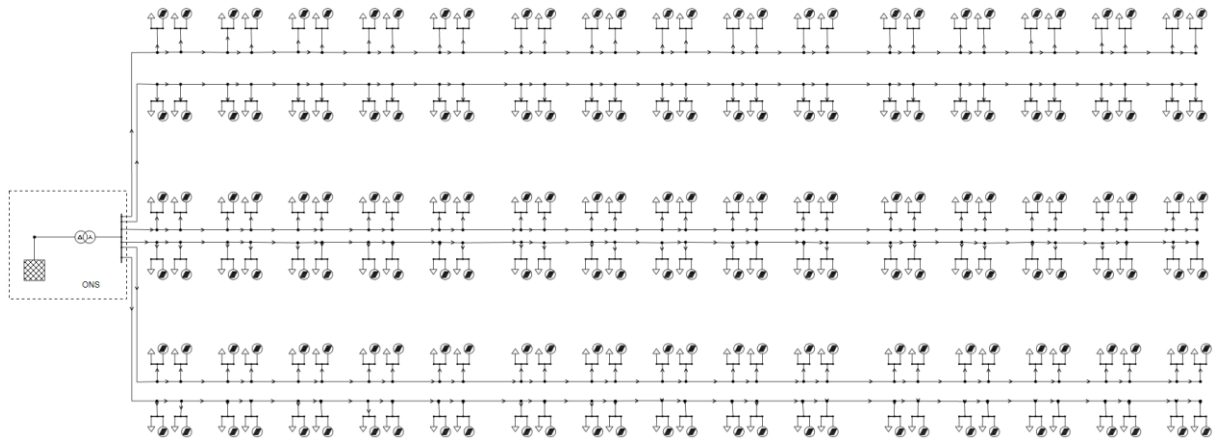


### S3b Hochdichte Ein- oder Zweifamilienhäusersiedlung



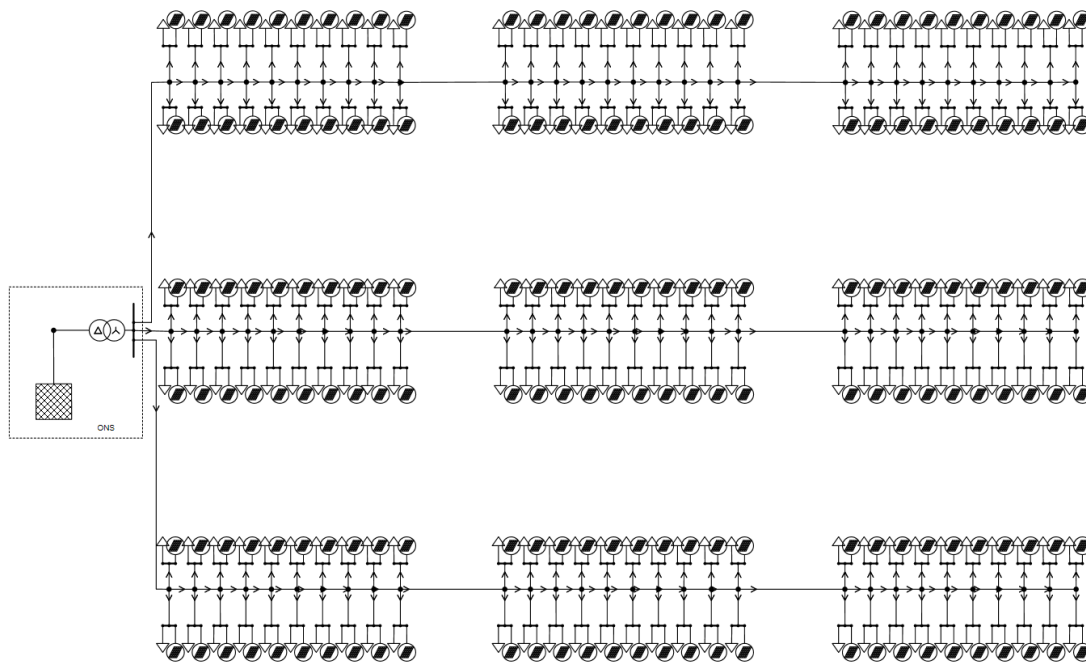
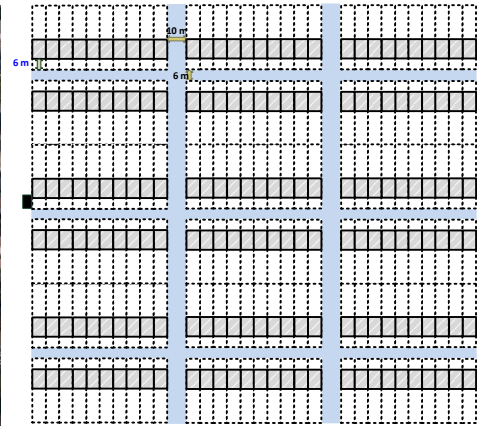
	$S_{iT}$	Leitungstyp	$N_{ge}$	$N_W$
S3b	630 kVA	KB	108	216

## S4a Doppelhaussiedlung



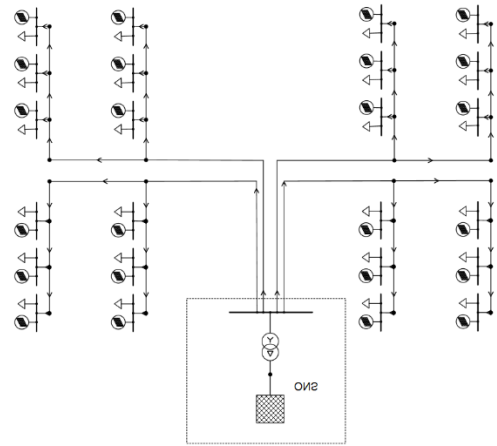
	$S_{iT}$	Leitungstyp	$N_{ge}$	$N_W$
S4a	400 kVA	KB	180	180

## S4b Reihenhaussiedlung

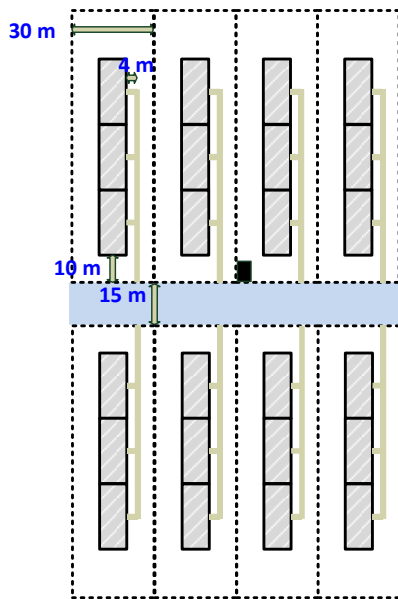


	$S_{iT}$	Leitungstyp	$N_{ge}$	$N_W$
S4b	400 kVA	KB	180	180

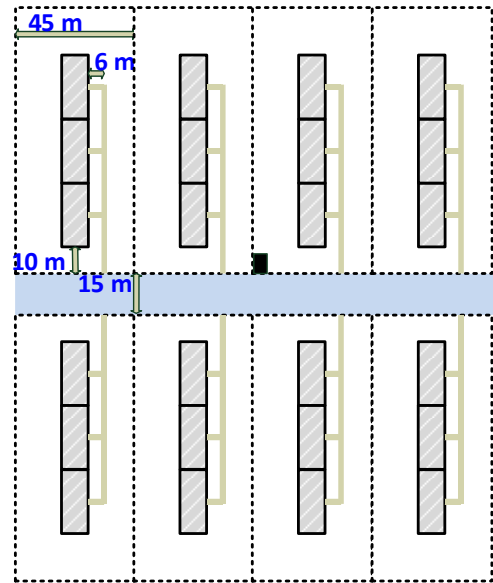
# S5a Zeilenbebauung



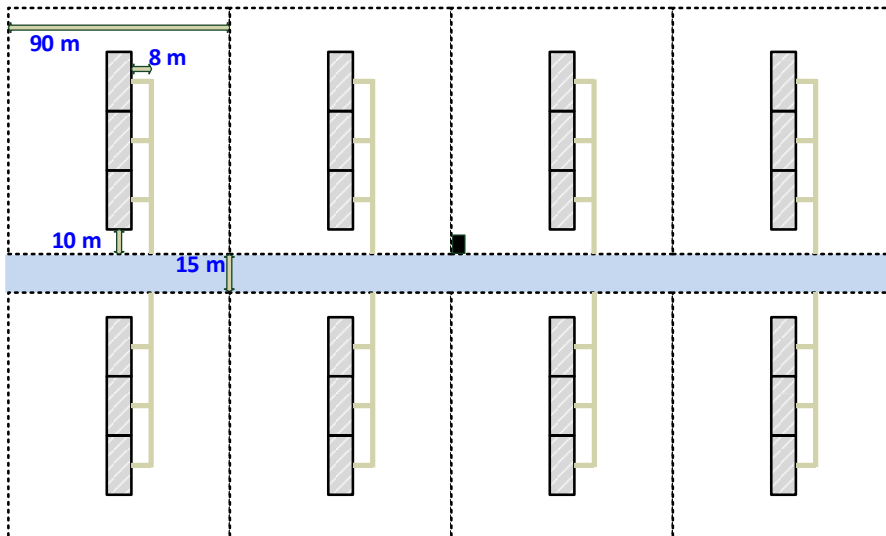
min:



mit:

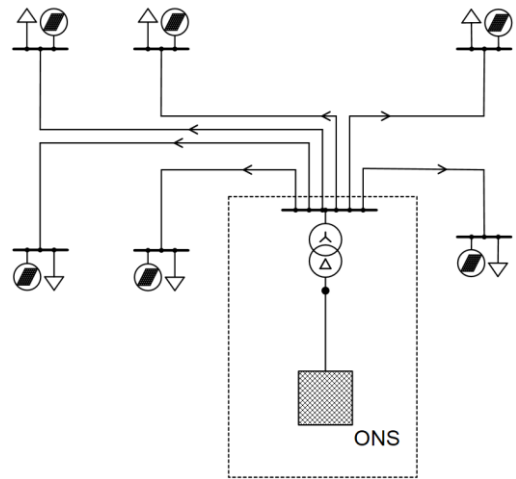


max:

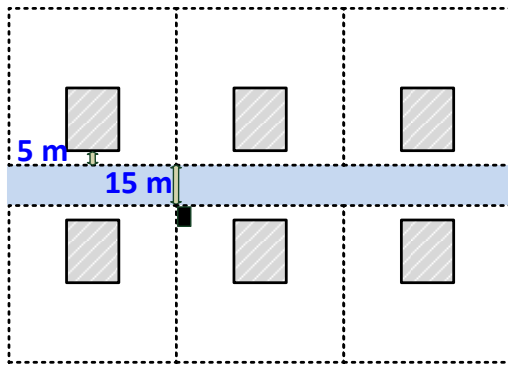


	$S_{rT}$	Leitungstyp	$N_{ge}$	$N_W$
S5a	630 kVA	KB	24	240

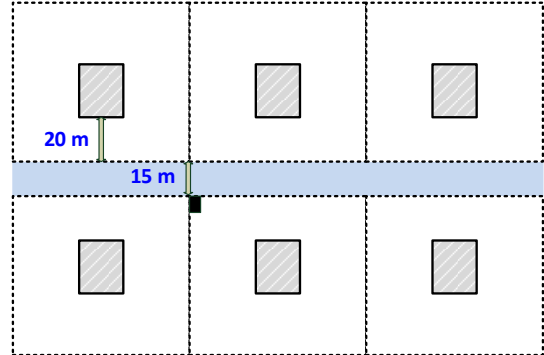
S5b Wohnhochhausbebauung



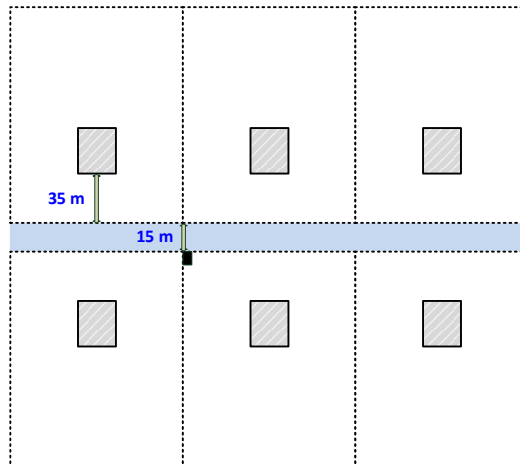
min:



mit:

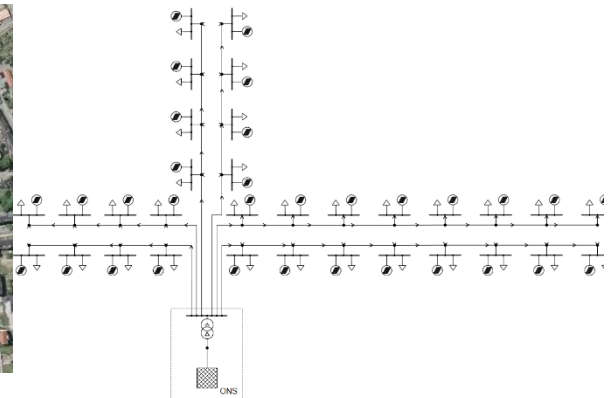


max:

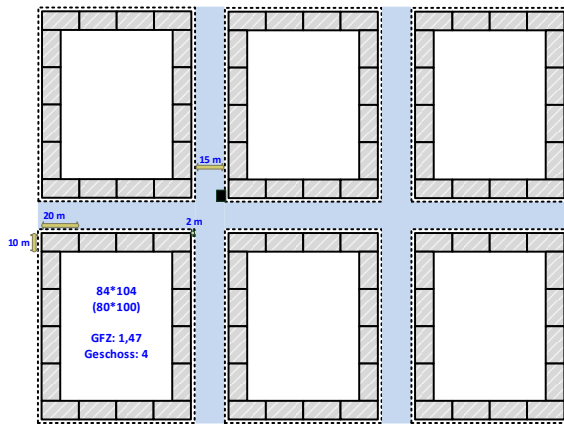


	$S_{rT}$	Leitungstyp	$N_{ge}$	$N_w$
S5b	630 kVA	KB	6	288

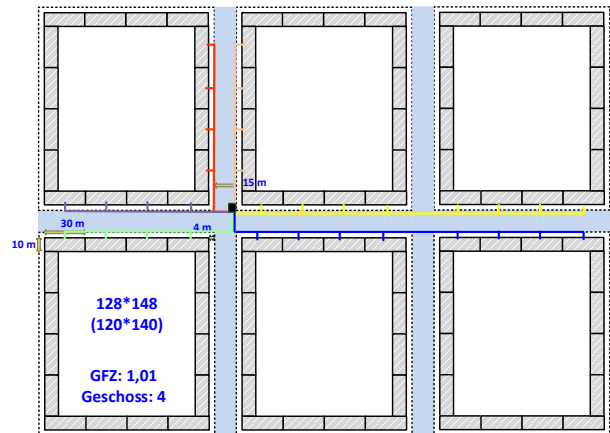
## S6a Blockbebauung



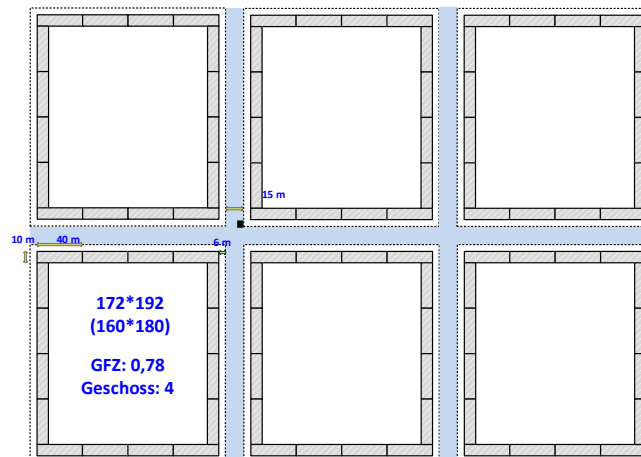
min:



mit:



max:



	$S_{T}$	Leitungstyp	$N_{ge}$	$N_w$
S6a	630 kVA	KB	32	256

## S6b Historische Altstadt

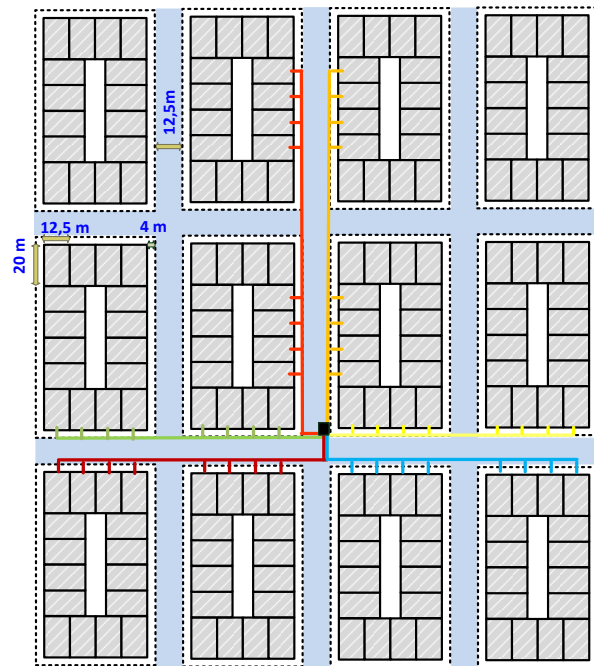
	S6b
$S_{rT}$	630 kVA
Leitungstyp	KB
$N_{ge}$	48
$N_w$	288



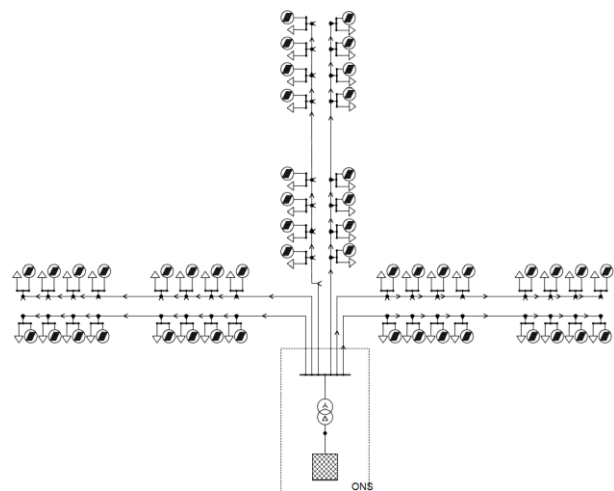
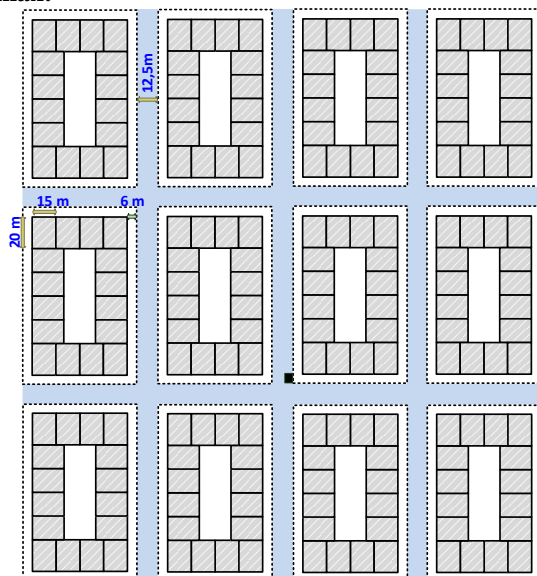
min:



mit:



max:



## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag präsentiert die Entwicklung von synthetischen NS-Netzmodellen für repräsentative Siedlungsstrukturen und dient gleichzeitig deren Dokumentation. Die Festlegung der repräsentativen Siedlungsstrukturen und die Ableitung der dazu gehörigen Daten der Gebäudetypen und der Geo-Strukturdaten wird beschrieben. Die verwendeten Netzplanungsgrundsätze und die Methodik der Netzplanungsverfahren werden erläutert. Die Netzstrukturen und die wichtigsten Kenndaten der daraus resultierenden 14 synthetischen NS-Netzmodelle mit je drei verschiedenen geografischen Ausdehnungen werden einzeln dargestellt.

Die NS-Netzmodelle basieren auf dem Vorgehen für die Untersuchungen in [2], wurden jedoch stellenweise angepasst.

In diesem Beitrag werden alle Informationen zur Erstellung der NS-Netzmodelle geliefert. Zur allgemeinen Verwendung werden die in diesem Beitrag dokumentierten NS-Netzmodelle für die Netzberechnungsprogramme „Matpower“ und „PSS<sup>®</sup>Sincal“ auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

Durch die detaillierte Dokumentation der Entwicklungsschritte sowie durch die Verwendung von üblichen Netzplanungsverfahren soll die Akzeptanz und Verbreitung dieser synthetischen NS-Netzmodelle gefördert werden und auf langfristige Sicht durch die verstärkte Verwendung in der Fachwelt zu vergleichbareren wissenschaftlichen Untersuchungen führen.



## Literaturangaben

- [1] IEEE Distribution Planning Working Group: Working Group Report. Radial Distribution Test Feeders. Transactions on Power System (1991) Vol. 6, No. 3
- [2] Rui, H.: Target-oriented Planning for Electric Distribution Grids with Smart Grid Metrics. Forschungsberichte des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiemanagement, Bd. 3. Herzogenrath: Shaker 2017
- [3] Roth, U. u. Häubi, F.: Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen, 1981. <https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=sbz-003:1981:99::668>, abgerufen am: 12.02.2018
- [4] Suter, S., Müller, A., Sommer, H. u. Kramer, D.: Siedlungsentwicklung und Infrastrukturkosten. Schlussbericht, 2000. [https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahU-KEwiQ0ZDB\\_5\\_ZAhVNyaQKHTWOBAYQFggnMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.are.admin.ch%2Fdam%2Fare%2Ffr%2Fdokumente%2Finfrastruktur%2Fpublikationen%2Fsiedlungsentwicklung-und-infrastrukturkosten.pdf.download.pdf%2Fsiedlungsentwicklung-und-infrastrukturkosten\\_de.pdf&usq=AOvVaw2j0eGlaaww4i2bTjcXmJhV](https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahU-KEwiQ0ZDB_5_ZAhVNyaQKHTWOBAYQFggnMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.are.admin.ch%2Fdam%2Fare%2Ffr%2Fdokumente%2Finfrastruktur%2Fpublikationen%2Fsiedlungsentwicklung-und-infrastrukturkosten.pdf.download.pdf%2Fsiedlungsentwicklung-und-infrastrukturkosten_de.pdf&usq=AOvVaw2j0eGlaaww4i2bTjcXmJhV), abgerufen am: 12.02.2018
- [5] Neuffer, H., Witterhold, F.-G., Pfaffenberger, W., Gregorzewski, A., Blesl, M., Fahl, U. u. Voß, A.: Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärme-Versorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien. Band 1 Grundlagen der Kraft-Wärme-Kopplung, Zertifizierungsverfahren und Fördermodelle. AGFW-Hauptstudie – Erster Bearbeitungsabschnitt, 2001. <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/x/de/publikationen/waerme/band1-lang.pdf>, abgerufen am: 12.02.2018
- [6] Buchert, M., Fritsch, U., Jenseit, W., Rausch, L., Deilmann, C., Schiller, G., Siedentop, S. u. Lipkow, A.: Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland. Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung – Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich „Öffentliche Infrastruktur, 2004. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2600.pdf>, abgerufen am: 12.02.2018
- [7] Jenssen, T. u. Karakoyun, E.: Einfluss von Siedlungsstruktur und Siedlungsentwicklung auf Infrastrukturkosten. Dargestellt am Beispiel der Abwasserentsorgung. Diplomarbeit, 2005. [http://www.forum-baulandmanagement.nrw.de/downloads/siedlungsstruktur\\_infrastrukturkosten.pdf](http://www.forum-baulandmanagement.nrw.de/downloads/siedlungsstruktur_infrastrukturkosten.pdf), abgerufen am: 12.02.2018
- [8] Scheffler, J.: Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten. Dissertation, 2002. [http://monarch.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/4595/data/Dissertation\\_Scheffler.pdf](http://monarch.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/4595/data/Dissertation_Scheffler.pdf), abgerufen am: 12.02.2018
- [9] Reinhardt, W. u. Trudel, H.: Wohndichte und Bebauungsformen. Praktische Entscheidungshilfen für die kommunale Planung. Veröffentlichung der Forschungsgemeinschaft Bauen und Wohnen, Stuttgart, Nr. 113. Stuttgart: DVA 1979
- [10] Kerber, G.: Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilnetzen für die Einspeisung aus Photovoltaikkleinanlagen. Dissertation, 2011. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/998003/998003.pdf>, abgerufen am: 12.02.2018
- [11] Geyer, H.: Kennzahlen für die Bau- und Immobilienwirtschaft - inkl. Arbeitshilfen online. Haufe Fachbuch, v.6768. München: Haufe Lexware Verlag 2017
- [12] Kaufmann, W.: Planung öffentlicher Elektrizitätsverteilungs-Systeme. Berlin: VDE-Verl. 1995
- [13] Nagel, H.: Systematische Netzplanung. Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze, Bd. 8. Berlin, Frankfurt am Main: VDE-Verl.; VWEW Energieverl. 2008
- [14] Brückl, O.: [spannungshaltung.de](http://spannungshaltung.de). Informationen rund um die Spannung im Verteilnetz. Informationsportal. <http://spannungshaltung.de/grundlagen/>
- [15] Markus Zdrallek (Hrsg.): Planungs- und Betriebsgrundsätze für ländliche Verteilungsnetze. Leitfaden zur Ausrichtung der Netze an ihren zukünftigen Anforderungen. 2016