

Synthetische MS-Netzmodelle für wissenschaftliche Untersuchungen

Wellßow, W.-H.; Ostermann, M.; Arnold, M.; Weisenstein, M.

Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement

1 Motivation und Ziel des Beitrags

Im Gegensatz zum Übertragungsnetz, dessen Struktur hinreichend genau bekannt ist, sind passende Netzmodelle für Mittelspannungsnetze (MS-Netze) wegen der hohen Anzahlen der MS-Netze und Verteilnetzbetreiber (VNB) nur schwer abzubilden. Des Weiteren ist eine detaillierte Darstellung realer MS-Netze in wissenschaftlichen Publikationen aus datenschutzrechtlichen Gründen meist nicht erwünscht. In dieser Arbeit werden MS-Netzmodelle sowie ihre Entwicklung im Detail erklärt. Damit stehen erstmals für die Öffentlichkeit nachvollziehbare MS-Netzmodelle für den deutschsprachigen Raum zur Verfügung. Sie können als Benchmark für wissenschaftliche Untersuchungen sowie zur Methodenentwicklung verwendet werden.

Künstliche MS-Netzmodelle mit übersichtlichen Strukturen lassen sich einfacher als Modelle realer Netze an veränderte Bedingungen anpassen. Die künstlichen Modelle lassen sich z. B. durch Eliminierung standardisierter Teilnetze unter Beibehaltung der grundsätzlichen Netzcharakteristiken verkleinern, während eine Verkleinerung realer Netze durch Eliminierung einmaliger Netzabschnitte die Netzcharakteristik verändert.

2 Grundeigenschaften der Mittelspannungsnetze

I. Betriebsmittel

Als Grundparameter wurde festgelegt, dass die Netze aus der 110-kV-Ebene versorgt werden, in der Stadt Kabel mit einer Nennspannung von 10 kV und auf dem Land Freileitungen mit 20 kV besitzen und ihnen 0,4-kV-Netze unterlagert sind. Insbesondere sind Kunden, die direkt aus der MS-Ebene versorgt werden, als Ortsnetzstationen (ONS) modelliert, weil diese in der Praxis häufig vergleichbare eigene Transformatoren verwenden und dadurch die Modelle vereinfacht werden. Beim Aufbau der künstlichen Netzmodelle sollen typische Kabel und Freileitungen verwendet werden. Dazu werden mit Hilfe von Literaturwerten und Herstellerangaben häufig verwendete Leitungen verwendet.

Die 110-kV/10-kV- bzw. 110-kV/20-kV-Umspannstationen bilden die Schnittstelle zwischen der Mittel- und der Hochspannungsebene. Die Umspannstationen enthalten abhängig von der gesamten Maximallast der Verbraucher zwei [1] oder maximal drei Transformatoren der gleichen Größe, welche zusammen eine installierte Leistung von bis zu 100 MVA haben können. Nach dem (N-1) Kriterium wird die Anzahl der Transformatoren so gewählt, dass bei Ausfall eines Transformators die Versorgung der Mittelspannungsebene weiterhin gewährleistet ist. Dazu werden bei Umspannstationen mit zwei Transformatoren diese zu jeweils maximal 50 % und bei drei Transformatoren diese jeweils zu maximal 66 % ausgelastet. Die zusätzliche Belastung durch die Leitungsverluste wird bei der Dimensionierung vernachlässigt. Bei der Entwicklung künstlicher MS-Netze werden keine spezifischen örtlichen Gegebenheiten berücksichtigt werden. Deshalb werden großflächigere Freiluftanlagen für die Umspannstationen verwendet, die allerdings nicht in städtischen Lastzentren aufgestellt werden. Als Schaltanlagenkonzept wird stets eine gekoppelte Doppelsammelschiene verwendet.

Das Mittelspannungsnetz versorgt über Netzstationen die Niederspannungsebene und Mittelspannungskunden. Beim Aufbau werden beide gleichermaßen als Last modelliert und folgend unter dem Begriff Ortsnetzstation zusammengefasst. Jede Ortsnetzstation besteht aus einem Transformator, dessen Bemessungsleistung zwischen 75 kVA und 2000 kVA liegt [1]. In den MS-Modellen werden Ortsnetztransformatoren mit den Bemessungsleistungen nach Tabelle 1 verwendet:

Tabelle 1: Bemessungsleistungen der verwendeten Ortsnetztransformatoren

Bemessungsleistungen in MVA	0,25	0,4	0,5	0,6	0,8	1,26	1,6
------------------------------------	------	-----	-----	-----	-----	------	-----

II. Netztopologie

Die Topologie eines Stromnetzes wird maßgeblich durch die Anzahl, die Lage und Last der zu versorgenden Ortsnetzstationen, die Lage und Leistung der Umspannstationen sowie die möglichen Trassen bestimmt. Zudem müssen betriebliche Grenzwerte eingehalten werden. Zur Gewährleistung einer hohen Versorgungszuverlässigkeit durch Einhaltung des (N-1) Kriteriums werden für die künstlichen MS-Netze Ringnetze verwendet [2]. Die Auslastung einer Ringhälfte soll aus Gründen der Versorgungssicherheit nicht größer als 50 % sein, so dass bei Ausfall einer Ringhälfte und Schließen der Trennstelle, alle Verbraucher versorgt werden können und somit die Leitung

nicht über 100 % ausgelastet wird. Die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens der Maximallast und des Ausfalls der Leitung direkt hinter der Schaltanlage ist jedoch so gering [3], dass aus wirtschaftlicher Sicht eine höhere Auslastung der Leitungen im Normalbetrieb toleriert wird. Da keine einheitlichen Richtlinien existieren, werden die Leitungen in dieser Arbeit zu 70 % belastet. Die Lage der Trennstelle zwischen den beiden Halbringen soll im Normalbetrieb idealerweise auf beiden Seiten das gleiche Spannungsniveau haben. Zudem wird in den künstlichen MS-Netzen nur eine einzige Umspannstation zur Versorgung verwendet.

III. Unterscheidung städtischer und ländlicher Mittelspannungsnetze

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, zwischen der Generierung von MS-Netzen für städtische und ländliche Gebiete zu unterscheiden:

- 1) Während in städtischen Gebieten die durchgängige Besiedlung zu räumlich verteilten Ortsnetzstationen eines MS-Netzes führt, weisen ländliche Gebiete zwischen den Orten größere unbesiedelte Flächen auf, die nicht mit NS-Netzen erschlossen werden; Ortsnetzstationen konzentrieren sich daher in den Orten.
- 2) Dezentrale Erzeugungsanlagen werden aus Platzgründen überwiegend in ländlichen Gebieten errichtet, die aufgrund der niedrigeren Bevölkerungs- und Industriedichte geringere Lastdichten als städtische Gebiete aufweisen. Als Konsequenz ist die Pro-Kopf-Leistung der dezentralen Erzeugungsleistung in ländlichen Gebieten erheblich größer als in städtischen Gebieten.

Zur Verringerung der Variantenzahl sind die städtischen Netze als 10-kV-Kabelnetze, die ländlichen als 20-kV Freileitungsnetze ausgeprägt. Zur Modellierung wurde die Netzplanungssoftware PSS®SINCAL 8.0 verwendet.

3 Modellierung städtischer MS-Netze

I. Allgemeine Vorgehensweise der Modellierung

Die folgende Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über die im Folgenden beschriebene Modellbildung von synthetischen städtischen Mittelspannungsnetzen. Als wesentlicher Ausgangspunkt der Modellbildung ist die Lastdichte eines homogenen Teilgebiets mit grün gekennzeichnet. Alle anderen Felder der Abbildung stellen Ergebnisse aus Berechnungen basierend auf dieser Lastdichte dar.

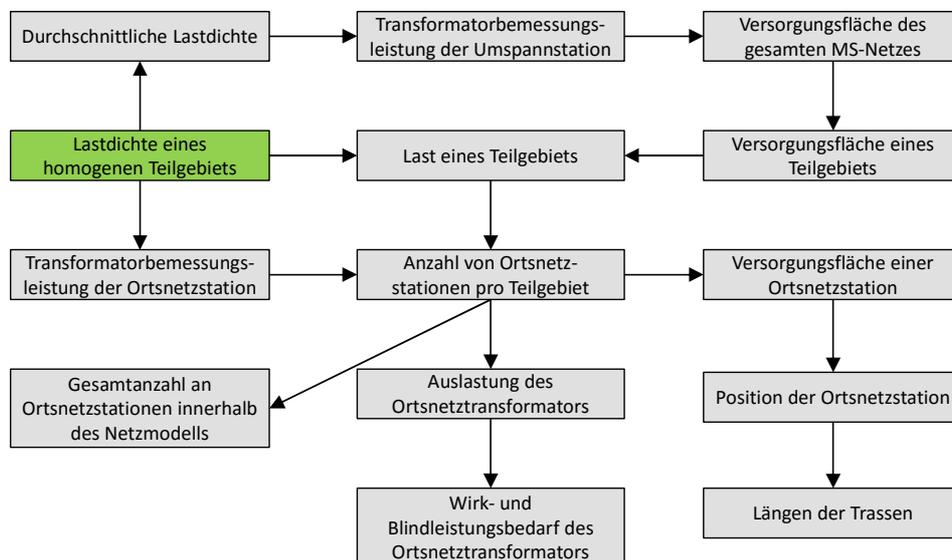


Abbildung 1: Vorgehensweise der Modellierung von städtischen MS-Netzen

II. Lastdichten in städtischen Gebieten

In dicht besiedelten Stadtgebieten mit hohen Gebäuden ist die Lastdichte deutlich höher als in der Altstadt von Kleinstädten. Um die Differenzierung der unterschiedlichen Lastdichten darzustellen, werden Lastdichtestufen mit Hilfe von Urbanisierungsgraden festgelegt [4]. Dabei wird die Stadt zunächst in Innenstadt, Zwischenzone und Stadtrand untergliedert. Für die Berücksichtigung der Größe der Städte werden jeweils zusätzliche drei Abstufungen verwendet: Großstädte (über 100.000 Einwohner), Mittelstädte (zwischen 20.000 und 100.000 Einwohner) und Kleinstädte (zwischen 5000 und 20.000 Einwohner) [5].

Die Lastdichten für Städte liegen zwischen 1 MVA/km² und ca. 100 MVA/km², wobei die Lastdichten nach Tabelle 2 festgelegt werden [1].

Tabelle 2: Städtische Lastdichten in MVA/km²

Stadttypen	Lastdichten in MVA/km ² in Zone		
	Innenstadt (hohe Lastdichte)	Zwischenzone (mittlere Lastdichte)	Stadttrand (geringe Lastdichte)
Großstadt	90	45	22,5
Mittelstadt	30	15	7,5
Kleinstadt	10	5	2,5

III. Aufbau des Lastdichtenmodells

Für die Entwicklung der Netzmodelle wird das Versorgungsgebiet einer Umspannstation in 5x5 gleichgroße Teilgebiete aufgeteilt. Die Lastdichte innerhalb eines Teilgebietes ist homogen, jedoch können sich die Lastdichten von Teilgebiet zu Teilgebiet unterscheiden. Die Kombination aus Teilgebieten mit unterschiedlichen Lastdichten ergibt somit ein inhomogenes räumliches Lastprofil für das gesamte MS-Netz. Als Lastdichten werden die in Tabelle 2 festgelegten Werte verwendet. Die jeweils drei charakteristischen Lastdichten für eine Großstadt, eine Mittelstadt und eine Kleinstadt werden in vier unterschiedlichen Anordnungen in den in Abbildung 2 dargestellten Lastdichteprofilen eingeteilt.

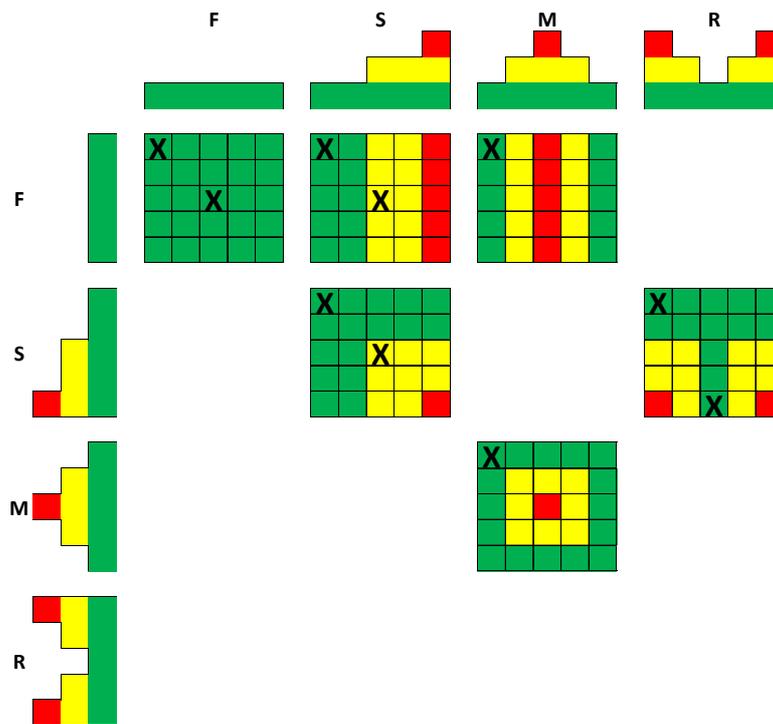


Abbildung 2: Lastdichteprofile der erzeugten städtischen MS-Netze

Innenstädte werden durch die höchste Lastdichte (rot), die Zwischenzone durch die mittlere Lastdichte (gelb) und der Stadttrand durch die geringe Lastdichte (grün) dargestellt. Im homogenen Fall ist die Lastdichte über das gesamte Versorgungsgebiet konstant und das Lastprofil somit flach (F). Für den inhomogenen Fall gibt es drei verschiedene Lastdichtenprofile. Beim ersten Profil steigt die Last von links nach rechts an, sodass ein schiefes (S) Profil entsteht. In den beiden weiteren inhomogenen Lastprofilen liegt der Lastschwerpunkt mittig (M) oder am Rand (R). Der erste Buchstabe beschreibt das eindimensionale Zeilenlastdichtenprofil und der zweite Buchstabe das Spaltenlastdichtenprofil. Ein zweidimensionales Lastdichtenprofil mit der Bezeichnung „FS“ entsteht also aus der Kombination des Zeilenlastdichtenprofils „F“ und dem Spaltenlastdichtenprofil „S“. Modelle mit hohen Lastdichten am Rand in Ringform („RR“) oder auch gegenüberliegend („FR“) sind in der Realität nicht zu finden. Die Eigenschaften der Modelle „SM“ und „MR“ werden ausreichend von den Modellen „MM“ und „SR“ abgedeckt. Für die Wahl des Standortes der Umspannstation werden der Abstand zum Lastzentrum und der durchschnittliche Abstand zu allen Teilgebieten berücksichtigt. Das Aufstellen der Umspannstation im Lastzentrum wird wegen der

hohen Kosten für Schaltanlagen in Innenräumen und aufgrund von Platzmangel nicht betrachtet. Als ungünstige Lage für die Umspannstation wird die Ecke des Versorgungsgebiets gewählt, wodurch tendenziell mehr Gesamtleitungslänge benötigt wird. Ist die Umspannstation in der Mitte, ist der durchschnittliche Abstand zu den Teilgebieten geringer. Für das Modell „SR“ wird als weitere günstige Lage das Teilgebiet zwischen den beiden Lastzentren gewählt. Abbildung 2 zeigt die sechs ausgewählten Modelle, in denen die Lage der Umspannstation durch ein „X“ markiert ist. Aus den Lastdichten der jeweiligen Teilgebiete lässt sich die durchschnittliche Lastdichte des gesamten Versorgungsgebietes berechnen.

$$\rho_L = \frac{\sum_{i=1}^{25} \rho_i}{25} \cdot 0,5 \cdot f_{DN} \quad (1)$$

ρ_L : Durchschnittliche Lastdichte des gesamten Versorgungsgebietes
 ρ_i : Lastdichte der Teilgebiete aus Tabelle 2

IV. Bestimmung der Bemessungsleistung eines Transformators in den Umspannstationen

Mit der durchschnittlichen Lastdichte des Versorgungsgebietes aus Gleichung 1 wird die Bemessungsleistung der Umspannstation berechnet. Werden wegen des (N-1) Kriteriums zwei Transformatoren verwendet, sind diese unter Vernachlässigung der Leitungsverluste zu je 50 % ausgelastet. Bei steigender Gesamtlast steigt auch die Größe der Umspannstation. Um eine Funktion zur Berechnung der Bemessungsleistung zu finden, wird in Tabelle 3 der höchsten Lastdichte die größte und der niedrigsten Lastdichte die geringste betrachtete Bemessungsleistung zugeordnet:

Tabelle 3: Startwerte zur Berechnung der Umspannwerksgröße

Lastdichten ρ_L in MVA/km ²	Bemessungsleistung $S_{rT,Ust}$ in MVA
90	80
1	16
0	0

Die größte gängige Umspannstation, welche jedoch nur selten und somit nur in Gebieten mit sehr hohen Lastdichten von 90 MVA/km² verwendet wird, hat eine Bemessungsleistung von 80 MVA. Für eine Lastdichte von 1 MVA/km² wird ein 16 MVA Transformator eingesetzt. Ein Gebiet ohne Last braucht keine Umspannstation, sodass die Bemessungsleistung 0 MVA beträgt. Um im Folgenden auf Basis von durchschnittlichen Lastdichten der Versorgungsgebiete die Bemessungsleistung der Umspannstation zu bestimmen wird eine Potenzfunktion gewählt. Anhand der Werte aus Tabelle 3 ergibt sich über einen Dreisatz die Potenzfunktion zu:

$$\{S_{rT,Ust}\} = 16 \cdot \{\rho_L\}^{0,357668} \quad (2)$$

$S_{rT,Ust}$: Bemessungsleistung des Transformators des Umspannwerks

Dabei entsprechen die Größen in den geschweiften Klammern den reinen Zahlenwerten, die über Gleichung 2 bestimmt werden. Die Größe des Versorgungsgebietes berechnet sich mit der Bemessungsleistung des Umspannwerks und der durchschnittliche Lastdichte durch Gleichung 3 zu:

$$A_{Ust} = \frac{S_{r,Ust}}{\rho_L} \quad (3)$$

A_{Ust} : Fläche des gesamten Versorgungsgebietes

Da nur eine begrenzte Zahl an Transformatoren zur Verfügung steht (reale Bemessungsleistung in MVA: 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80) wird die in Gleichung 3 ausgerechnete Bemessungsleistung auf die nächste reale Bemessungsleistung gerundet [6].

Tabelle 4 stellt die anhand der durchschnittlichen Lastdichten berechneten Größen der Umspannstationen und deren Versorgungsfläche für die jeweiligen Lastdichten dar.

Tabelle 4: Lastdichte mit abgeleiteten Transformatorgrößen und Versorgungsflächen

Lastdichten ρ_L in MVA/km ²	Bemessungsleistung $S_{RT,Ust}$ in MVA		Versorgungsfläche A_{Ust} in km ²
	Ideal	Real	
90,0	80,0	80,0	0,89
45,0	62,4	63,0	1,40
30,0	54,0	50,0	1,67
22,5	48,7	50,0	2,22
15,0	42,1	40,0	2,67
10,0	36,5	40,0	4,00
7,5	32,9	31,5	4,20
5,0	28,5	31,5	6,30
2,5	22,2	20,0	8,00
1,0	16,0	16,0	16,00

V. Bestimmung der Transformatorbemessungsleistung der Ortsnetzstationen

Zur Berechnung der Bemessungsleistung der Transformatoren der Ortsnetzstationen ($S_{RT,ONS}$) anhand der Lastdichten der Teilgebiete (ρ_i) wird der Ansatz wie in Abschnitt 3.IV anhand der Startwerte in Tabelle 5 verfolgt.

Tabelle 5: Startwerte zur Berechnung der Transformatorgrößen der Ortsnetzstationen

Lastdichte ρ_i in MVA/km ²	Bemessungsleistung $S_{RT,ONS}$ in MVA
90	1,60
1	0,25
0	0

Anhand der Werte aus Tabelle 5 ergibt sich analog zu Gleichung 2 die Potenzfunktion zu:

$$\{S_{RT,ONS}\} = 0,25 \cdot \{\rho_i\}^{0,4125} \quad (4)$$

$S_{RT,ONS}$: Bemessungsleistung des Transformatoren der Ortsnetzstation

Da ebenfalls standardisierte Transformatoren verwendet werden sollen [6], werden die berechneten Werte in auf die nach Tabelle 6 entsprechenden Bemessungsleistungen gerundet.

Tabelle 6: Lastdichte mit abgeleiteten Transformatorgrößen der Ortsnetzstationen

Lastdichten ρ_i in MVA/km ²	Bemessungsleistung $S_{RT,ONS}$ in MVA	
	Ideal	Real
90,0	1,60	1,60
45,0	1,34	1,26
30,0	1,22	0,80
22,5	1,13	0,80
15,0	1,02	0,80
10,0	0,93	0,63
7,5	0,86	0,63
5,0	0,78	0,40
2,5	0,66	0,40
1,0	0,25	0,25

VI. Anzahl und Auslastung der Ortsnetzstationen im homogenen Teilgebiet

Die Fläche eines der 25 Teilgebiete berechnet sich mittels Gleichung 5, d.h. die Flächen aller Teilgebiete gleich groß sind.

$$A_{\text{Teil}} = \frac{A_{\text{Ust}}}{25} \quad (5)$$

A_{Teil} : Fläche eines homogenen Teilgebiets

Aus der Lastdichte und der Fläche des jeweiligen homogenen Teilgebietes berechnet sich die Gesamtlast eines Teilgebiets:

$$S_{\text{Teil}} = A_{\text{Teil}} \cdot \rho_i \quad (6)$$

S_{Teil} : Gesamte Scheinlast eines homogenen Teilgebiets

Um die Gesamtlast eines Teilgebiets abzudecken werden in diesen Teilgebieten mehrere Ortsnetzstationen platziert. Dazu wird ein Teilgebiet in gleichgroße rechteckige Gebiete aufgeteilt. Die Ortsnetzstationen werden jeweils in der Mitte dieser Gebiete platziert. Damit die Aufteilung nicht zu unrealistischen länglichen Versorgungsflächen führt, wird das Seitenverhältnis auf 1:2 begrenzt. So wird festgelegt, dass mehr Stationen übereinander als nebeneinander angeordnet werden und somit die horizontale Kantenlänge immer größer oder gleich der vertikalen Kantenlänge ist. Dazu werden die in Tabelle 3 sechs aufgeführten Aufteilungsmöglichkeiten der Ortsnetzstationen festgelegt.

Tabelle 7: Aufteilung der Anzahl von Ortsnetzstationen in einem Teilgebiet

Anzahl der Ortsnetzstationen n_{ONS}	Anordnung der Ortsnetzstationen	
	Waagrecht n_{W}	Senkrecht n_{S}
1	1	1
2	1	2
4	2	2
6	2	3
8	2	4
9	3	3
12	3	4
15	3	5
16	4	4
20	4	5

Durch die Gesamtlast eines Teilgebiets aus Gleichung 6 und der realen Bemessungsleistungen der Ortsnetzstationen aus Tabelle 6 wird die ideale Anzahl der benötigten Ortsnetzstationen wie folgt berechnet:

$$n_{\text{ONS,ideal}} = \frac{S_{\text{Teil}} \cdot \frac{1}{0,8}}{S_{\text{rT,ONS}}} \quad (7)$$

$n_{\text{ONS,ideal}}$: Ideale Anzahl von Ortsnetzstationen in einem homogenen Teilgebiet

Die ideale Anzahl wird auf den nächstgrößeren Wert der Tabelle 7 aufgerundet. Die resultierende Auslastung der Ortsnetztransformatoren wird anhand der gerundeten Anzahl neu bestimmt:

$$\eta_{\text{ONS}} = \frac{S_{\text{Teil}}}{S_{\text{rT,ONS}} \cdot n_{\text{ONS}}} \quad (8)$$

η_{ONS} : Auslastung der Transformatoren der Ortsnetzstation

Die aus der gerundeten Anzahl von Ortsnetzstationen resultierende Last einer Ortsnetzstation wird durch die Multiplikation der Auslastung des Ortsnetztransformators mit der jeweiligen Bemessungsleistung berechnet:

$$S_{\text{ONS}} = \eta_{\text{ONS}} \cdot S_{\text{FT,ONS}} \quad (9)$$

S_{ONS} : Last einer Ortsnetzstation

Unter Verwendung eines Leistungsfaktors $\cos(\varphi) = 0,99$ ergeben sich der Wirk- (P_{ONS}) und der Blindleistungsbedarf (Q_{ONS}) der Ortsnetzstation anhand von Gleichung 10. Der Leistungsfaktor wurde aus Konsistenzgründen entsprechend den Annahmen der Niederspannungsnetzmodelle des Lehrstuhls ESEM festgelegt, siehe [7].

$$\begin{aligned} P_{\text{ONS}} &= \cos(\varphi) \cdot S_{\text{ONS}} \\ Q_{\text{ONS}} &= \sin(\cos^{-1}(\varphi)) \cdot S_{\text{ONS}} \end{aligned} \quad (10)$$

P_{ONS} : Wirkleistungsbedarf der Ortsnetzstation

Q_{ONS} : Blindleistungsbedarf der Ortsnetzstation

Die Leistungsdaten und die Positionen aller Ortsnetzstationen im gesamten Versorgungsgebiet sind somit festgelegt. In Abbildung 3 ist beispielhaft eine Aufteilung des Versorgungsgebiets des Lastdichtenmodells „MM“ aus Abbildung 3 dargestellt. Das rot markierte Teilgebiet stellt ein Gebiet mit hoher Lastdichte dar, welches von neun Ortsnetzstationen versorgt wird. Die acht gelb markierten Teilgebiete mittlerer Lastdichte werden von jeweils acht Ortsnetzstationen versorgt. Die sechzehn grün markierten Teilgebiete, deren Last durch je vier Netzstationen abgedeckt wird, haben die geringste Lastdichte. Die Lage der Umspannstation ist durch ein „X“ gekennzeichnet.

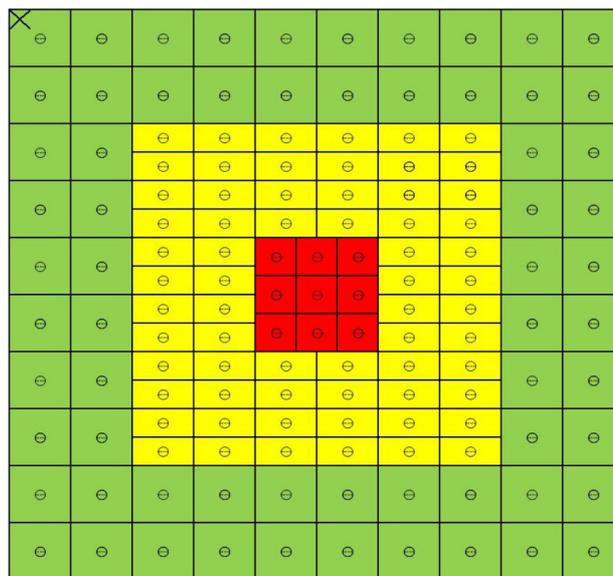


Abbildung 3: Beispielhafte Aufteilung der Ortsnetzstationen im Versorgungsgebiet

VII. Berechnung der geometrischen Größen

Insbesondere für die erforderlichen Leitungslängen in den Versorgungsgebieten ist die Kantenlänge (α_{Teil}) der Teilgebiete. Diese werden auf Basis der Fläche dieser Teilgebiete aus Gleichung 5 durch Gleichung 11 berechnet.

$$\alpha_{\text{Teil}} = \sqrt{A_{\text{Teil}}} \quad (11)$$

α_{Teil} : Kantenlänge der Teilgebiete

Mit der Anzahl der Ortsnetzstationen pro Teilgebiet und der Fläche des Teilgebiets wird die Versorgungsfläche einer Ortsnetzstation bestimmt:

$$A_{\text{ONS}} = \frac{A_{\text{Teil}}}{n_{\text{ONS}}} \quad (12)$$

A_{ONS} : Fläche des Versorgungsgebiets einer Ortsnetzstation

Für die Versorgung aller Netzstationen werden Trassen benötigt. Hierzu werden benachbarte Ortsnetzstationen, deren Versorgungsgebiete aneinandergrenzen, miteinander verbunden. Diagonale Verbindungen werden zwischen Teilgebieten gleicher Lastdichte nicht verwendet, um sich bei der Wahl der Trassen an den Straßenverläufen in Städten zu orientieren. Der waagerechte und senkrechte Abstand d_W bzw. d_S von zwei Netzstationen innerhalb eines Teilgebiets oder von benachbarten homogenen Teilgebieten berechnet sich mit der Anzahl n_W bzw. n_S der nebeneinander- und übereinanderliegenden Versorgungsgebiete (Tabelle 7):

$$d_W = \frac{\alpha_{\text{Teil}}}{n_W} \quad (13)$$

d_W : Waagerechter Abstand zwischen zwei Ortsnetzstationen

Die Berechnung des senkrechten Abstands zwischen zwei Netzstationen erfolgt analog. Beim Übergang von Teilgebieten unterschiedlicher Lastdichten kann die jeweilige interne Aufteilung in Versorgungsbereiche von Ortsnetzstationen dazu führen, dass schräge Abstände entstehen. Diese Abstände werden unter Verwendung des *Satzes von Pythagoras* berechnet.

VIII. Dezentrale Energieerzeugung im städtischen MS-Netzmodell

Die Bestimmung der in städtischen MS-Netzmodellen installierten dezentralen Erzeuger basiert auf den in Tabelle 8 aufgeführten installierten Leistungen für Onshore-Windkraftanlagen und Solarkraftanlagen über alle Spannungsebenen in ganz Deutschland für das Jahr 2015 aus [8] und für das Jahr 2025. Die Daten des Jahres 2025 basieren auf der prognostizierten installierten Leistung über alle Spannungsebenen aus [9] und der Annahme, dass das Verteilungsverhältnis auf die Spannungsebenen weiterhin der Verteilung des Jahres 2015 entspricht.

Tabelle 8: Onshore-Wind und Solarkraftanlagen über alle Spannungsebenen

Spannungsebene	Windenergie an Land in MW		Solarenergie in MW	
	2015	2025	2015	2025
HS (alle)	16131	23938	2196	2616
HS/MS	5877	8721	645	768
MS	19135	28396	12969	15451
MS/NS	65	96	1047	1247
NS	33	49	22474	26775
Gesamt	41241	61200	39332	46860

Weiter wird in Tabelle 9 die Gesamtfläche Deutschlands entsprechend der Besiedlungsdichte dargestellt [10].

Tabelle 9: Auf die Besiedlungsdichte bezogene Flächen Deutschlands (Stand 2016)

Besiedlungsdichte	Fläche in km ²
Dicht besiedelt	17822,22
Mittlere Besiedlungsdichte	102002,81
Gering besiedelt	237583,71
Gesamt	357408,21

Zudem wird angenommen, dass alle in NS-Netzen installierten Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) auf Hausdächern verbaut sind. Die besiedelte Fläche entspricht 9,2 % der Gesamtfläche Deutschlands [10]. Zur Integration dezentraler Erzeuger in städtische MS-Netze wird die Annahme getroffen, dass aufgrund der Besiedlungsdichte dieser Modelle, auf HS/MS- oder MS-Ebene keine Anlagen installiert sind. Diese sind für die MS-Netzmodelle ausschließlich in ländlichen Netzmodellen vorgesehen. Dementsprechend werden in städtischen MS-Netzmodellen nur in Niederspannungsnetzen (MS/NS und NS) angeschlossene PV-Anlagen entsprechend zu Tabelle 8 implementiert. Zur Berechnung der in städtischen MS-Netzmodellen zu integrierenden PV-Anlagen für das Jahr 2025 wird anhand von Gleichung 14 die Dichte von PV-Anlagen der besiedelten Fläche Deutschlands bestimmt.

$$\rho_{\text{inst,PV,NS}} = \frac{P_{\text{inst,PV,NS}}}{A_{\text{Ger,ges}} \cdot a_{\text{Siedlung}}} = \frac{28022 \text{ MW}}{357408,21 \text{ km}^2 \cdot 0,092} = 0,85 \frac{\text{MW}}{\text{km}^2} \quad (14)$$

- $\rho_{\text{inst,PV,NS}}$: Leistungsdichte von PV-Anlagen der besiedelten Fläche Deutschlands
 $P_{\text{inst,PV,NS}}$: Installierte PV-Anlagen in der NS-Ebene für das Jahr 2025
 $A_{\text{Ger,ges}}$: Gesamtfläche Deutschlands
 a_{Siedlung} : Anteil der besiedelten Fläche in Deutschland

Diese Leistungsdichte für PV-Anlagen wird entsprechend Gleichung 15 mit der Fläche eines homogenen Teilnetzgebiets aus Gleichung 5 multipliziert um die in diesem Teilnetzgebiet auf NS-Ebene installierte Leistung aus PV-Anlagen zu ermitteln.

$$P_{\text{inst,PV,Teil}} = \rho_{\text{inst,PV,NS}} \cdot A_{\text{Teil}} \quad (15)$$

- $P_{\text{inst,PV,Teil}}$: Leistung der installierten Windkraft in der MS-Ebene dünnbesiedelter Gegenden in Deutschland

Diese Leistung wird gleichmäßig auf alle Ortsnetzstationen des jeweiligen Teilgebiets verteilt. Durch diesen Ansatz wird Teilgebieten mit geringer Besiedlungsdichte die gleiche Leistung aus Photovoltaik zugewiesen wie dichtbesiedelten Teilgebieten. Allerdings ist aufgrund der geringeren Anzahl von Ortsnetzstationen in dünnbesiedelten Teilgebieten die installierte Leistung von PV-Anlagen pro NS-Netz deutlich größer als in NS-Netzen dichter besiedelter Teilgebiete. In Tabelle 10 sind die durch dieses Verfahren berechneten installierten Leistungen dezentraler Erzeugung aus PV-Anlagen auf NS-Ebene für die Lastdichtenmodelle „MM“ für das Jahr 2025 dargestellt.

Tabelle 10: Installierte Leistung dezentraler Erzeuger pro Ortsnetzstation in Stadtnetzen

Stadttyp	Fläche eines homogenen Teilgebiets	Installierte Leistung pro Teilgebiet	Installierte Leistung pro Ortsnetzstation		
			Hohe Lastdichte	Mittlere Lastdichte	Geringe Lastdichte
Großstadt	0,062 km ²	0,053 MW	0,009 MW	0,013 MW	0,013 MW
Mittelstadt	0,148 km ²	0,126 MW	0,016 MW	0,032 MW	0,032 MW
Kleinstadt	0,278 km ²	0,236 MW	0,039 MW	0,059 MW	0,059 MW

4 Modellierung ländlicher MS-Netze

I. Lastdichten in ländlichen Gebieten

Zur Bestimmung der Lastdichten in ländlichen Gebieten werden zuerst die in Tabelle 11 aufgeführten Strukturdaten von 29 Verteilnetzbetreibern analysiert.

Tabelle 11: Strukturdaten von 29 ländlichen Verteilnetzbetreiber

Verteilnetzbetreiber	Einwohnerzahl	Maximallast in MW
RWE Rhein-Ruhr Netzservice GmbH	5.085.798	10.410
EnBW AG	4.901.977	9.560
E.On Bayern	4.771.390	12.042
Vatenfall Berlin	3.456.000	4.999
RWE Westfalen-Weser-Ems Netzservice GmbH	2.657.666	5.350
Mitnetz Strom	2.591.786	5.564
EWE NETZ GmbH	2.225.080	5.647
E.On Edis	2.063.210	5.965
Syna GmbH	1.647.600	3.396
E.On Avacon	1.633.500	3.493
E.On Mitte AG	1.455.841	2.972
Stadtwerke München	1.372.925	3.024
Schleswig-Holstein Netz AG	1.367.774	3.425
E.On Westfalen Weser	1.258.447	2.783
Thüringer Energienetze GmbH	1.147.733	2.909
N-ERGIE Netz GmbH	1.127.483	2.988
LEW Verteilnetz GmbH	1.006.171	3.133
VNB Rhein-Main-Neckar	716.000	1.848
Enso Netz GmbH	652.901	1.292
Pfalzwerke AG	615.500	1.253
E.On Avacon	577.683	1.618
DREWAG NETZ AG	517.897	1.894
ovag Netz AG	446.692	806
KEVAG Netz	370.455	630
LSW Netz GmbH	335.580	795
SVO Energie GmbH	244.150	714
Stadtwerke Magdeburg	234.044	639
Stadtwerke Heidelberg	161.172	275
Harz Energie Netz GmbH	141.987	425
Gesamt	44.784.442	99.848,4

Die Gesamtlast der Netzbetreiber wird zur Bestimmung der Lastdichten durch die Gesamtanzahl der Einwohner geteilt. Die Ortsnetzstationen werden weiter als nicht voll ausgelastet angenommen. Mit der Annahme einer Auslastung von 0,6 berechnet sich die durchschnittliche Maximallast pro Person durch:

$$P_{\max,\emptyset} = \frac{P_{\max,\text{ges}}}{N_{\text{ges}}} \cdot \eta_{\text{ONS}} = \frac{99848 \text{ MVA}}{44784442 \text{ Personen}} \cdot 0,6 \approx 1,33 \frac{\text{kVA}}{\text{Person}} \quad (16)$$

- $P_{\max,\emptyset}$: Durchschnittliche Maximallast pro Person
 $P_{\max,\text{ges}}$: Aggregierte Maximallast der 29 VNBs aus Tabelle 11
 N_{ges} : Aggregierte Einwohnerzahl von 29 VNBs
 η_{ONS} : Angenommene Auslastung der Ortsnetzstationen

Mit der Einwohnerzahl eines Ortes und der durchschnittlichen Maximallast pro Person kann nun für ländliche Beispielnetze die Maximallast für jeden Ort mittels Gleichung 17 bestimmt werden:

$$P_{\text{Ort,max}} = 1,33 \frac{\text{kVA}}{\text{Person}} \cdot N_{\text{Ort}} \quad (17)$$

- $P_{\text{Ort,max}}$: Maximallast eines Orts
 N_{Ort} : Anzahl an Einwohnern eines Orts

Die Lastdichte eines Orts ergibt sich aus der besiedelten Ortsfläche und der Last eines Ortes zu:

$$\rho_{\text{Ort}} = \frac{P_{\text{Ort,max}}}{A_{\text{Ort}}} \quad (18)$$

- ρ_{Ort} : Lastdichte eines Orts
 A_{Ort} : Besiedelte Ortsfläche

II. Aufbau des ländlichen Lastdichtenmodells

Für den Aufbau von ländlichen MS-Netzmodellen wird ebenfalls die Entwicklung eines Lastdichtenmodells verwendet. Dieses basiert auf den Verbandsgemeinden Irrel und Edenkoben/Maikammer, die in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt sind.

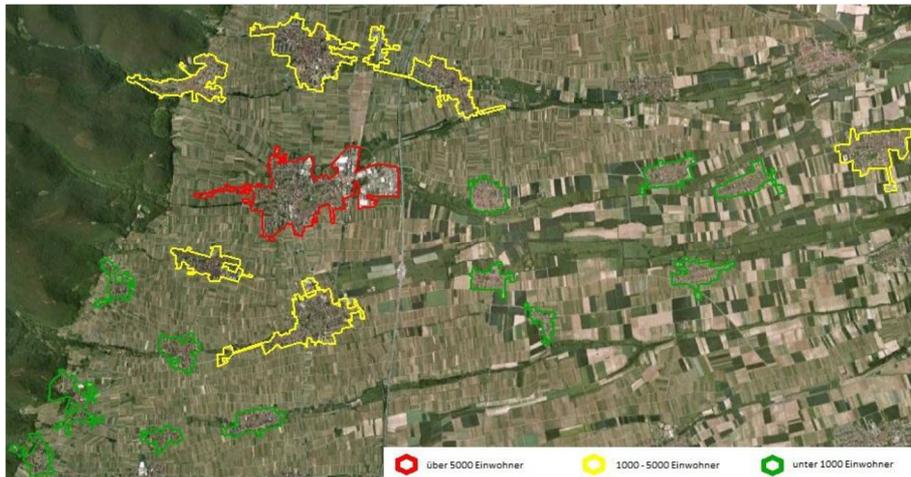


Abbildung 4: Verbandsgemeinde Edenkoben/Maikammer

Die besiedelten Flächen der Ortschaften sind dabei je nach Einwohnerzahl in drei Kategorien eingeordnet und farbig markiert. Im dichterbesiedelten Gebiet der Verbandsgemeinde Edenkoben/Maikammer sind Orte über 5000 Einwohner rot, Orte zwischen 1000 und 5000 Einwohner gelb und Orte unter 1000 Einwohner grün markiert.

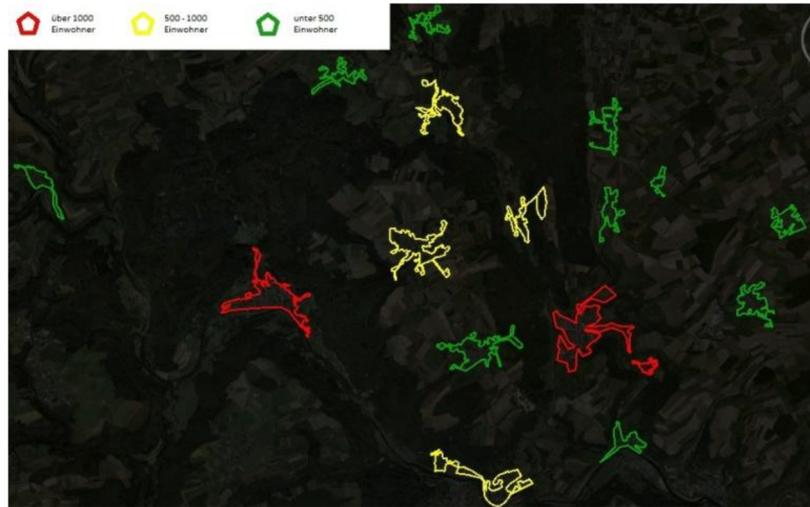


Abbildung 5: Verbandsgemeinde Irrel

Das dünnbesiedelte Gebiet der Verbandsgemeinde Irrel hat zwei Dörfer (rot markiert) mit einer Einwohnerzahl über 1000. Die vier gelb markierten Dörfer haben zwischen 500 und 1000 Einwohner. Die übrigen neun Dörfer haben unter 500 Dorfbewohner. Für die Ermittlung der durchschnittlichen Leitungslänge zwischen zwei Dörfern werden die Abstände der Dörfer zueinander mit Hilfe der Software Google Earth bestimmt. Ähnlich wie in den städtischen Gebieten werden bei der Verbindung der Orte über Freileitungen die Straßenverläufe berücksichtigt. Dadurch werden ausschließlich waagerechte und senkrechte Verbindungen angenommen. Diagonale Verbindungen zwischen Orten werden nicht betrachtet. Am Beispiel der Verbandsgemeinde Edenkoben/Maikammer ist zu erkennen, dass mit wachsender Entfernung zum größten Ort Edenkoben die umliegenden Ortschaften kleiner werden. Anhand der Verbandsgemeinde Irrel wird abgeleitet, dass die größten Orte nah nebeneinander liegen. Zur Modellierung werden wie in städtischen Gebieten eindimensionale Profile für die Darstellung der Lastdichten verwendet. Durch Kombination von zwei eindimensionalen Lastdichtenprofilen ergeben sich die in Abbildung 6 dargestellten Lastdichtenmodelle.

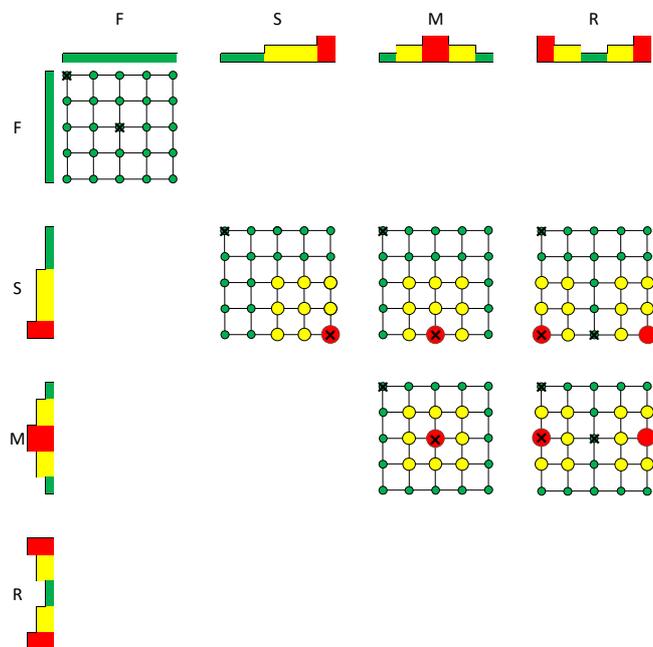


Abbildung 6: Lastdichtenmodelle ländlicher Mittelspannungsnetze

Die Einwohneranzahl wird durch die Größe des Kreises und die Lastdichte durch Farbe des Kreises dargestellt. Ein großer roter Kreis entspricht einem Dorf mit großer Einwohnerzahl und hoher Lastdichte. Die kleinen grünen Kreise repräsentieren Ortschaften mit geringen Einwohnerzahlen und niedrigen Lastdichten. Wie in Abbildung 4 und Abbildung 5 zu erkennen ist, ist die Anzahl an großen Orten in einem Versorgungsgebiet gering. Weil die

Modelle „FS“, „FM“, „FR“ und „RR“ fünf oder mehr große Orte beinhalten, werden sie nicht berücksichtigt. Die Umspannstation für das zu versorgende Gebiet wird für drei Fälle modelliert. Als ungünstige Position wird die Ecklage mit möglichst großem Abstand zum Lastschwerpunkt festgelegt. In den beiden günstigen Fällen liegt die Umspannstation im Ort mit der höchsten Last oder in der Mitte der beiden Orte mit den höchsten Lasten. Abbildung 6 zeigt die möglichen Stellen für die Umspannstation durch ein „X“.

III. Bestimmung der Parameter zur Modellbildung ländlicher MS-Modelle

Bei der Modellbildung ländlicher MS-Netze werden ausschließlich 400 kVA Transformatoren mit einer maximalen Auslastung von 60 % verwendet. Die Anzahl der Ortsnetzstation pro Ort ist abhängig von der Last, welche entsprechend Gleichung 17 mit der durchschnittlichen Last pro Person von 1,33 kVA und der Anzahl der Einwohner pro Ortsnetzstation bestimmt wird. Über die maximale Auslastung eines Ortsnetztransformators lässt sich gemäß Gleichung 19 die Anzahl an Personen pro Ortsnetzstation ermitteln.

$$N_{\text{ONS,Land}} = \frac{\eta_{\text{ONS,Land}} \cdot S_{\text{rT,ONS,Land}}}{1,33 \frac{\text{kVA}}{\text{Person}}} = \frac{0,6 \cdot 400 \text{ kVA}}{1,33 \frac{\text{kVA}}{\text{Person}}} \approx 180 \text{ Personen} \quad (19)$$

- $N_{\text{ONS,Land}}$: Anzahl an Personen je ONS in ländlichen MS-Modellen
 $\eta_{\text{ONS,Land}}$: Maximale Auslastung von ONS in ländlichen MS-Modellen
 $S_{\text{rT,ONS,Land}}$: Bemessungsleistung der ONS-Transformatoren

Nach Gleichung 19 werden pro 400-kVA-Ortsnetzstation 180 Personen versorgt. Um alle Transformatoren gleichmäßig mit 60 % auszulasten, wird die Einwohnerzahl der Orte durch die Anzahl an Ortsnetzstationen festgelegt. Für einen Ort eines Modellnetzes mit beispielsweise vier Ortsnetzstationen, berechnet sich somit eine Einwohnerzahl von 720 mit einer Last von 957,6 kVA.

Als Wesentliche Ausgangsbasis zur Bestimmung der Modellparameter für ländliche MS-Netze dienen Tabelle 12 und Tabelle 13. Diese enthalten Daten der Verbandsgemeinden Irrel und Edenkoben/Maikammer bezüglich Einwohnerzahl, besiedelter Fläche, Maximallast und Lastdichte. Die Daten der Einwohnerzahl und der besiedelten Fläche entsprechen recherchierten Daten aus [11] und [12] während die Maximallast und Lastdichte aus den recherchierten Daten entsprechend der Gleichungen 17 und 18 berechnet werden.

Tabelle 12: Ausgangsdaten dünnbesiedelter MS-Netzmodelle

Dorf	Einwohnerzahl	Besiedelte Fläche in km ²	Maximallast $P_{\text{Ort,max}}$ in MVA	Lastdichte ρ_{Ort} in MVA/km ²
Minden	142	0,22	0,189	0,858
Kaschenbach	56	0,07	0,074	1,064
Ernzen	427	0,5	0,568	1,136
Schankweiler	177	0,19	0,235	1,239
Niederweis	233	0,21	0,310	1,476
Eisenach	359	0,3	0,477	1,592
Echternacherbrück	700	0,57	0,931	1,633
Irrel	1383	1,1	1,839	1,673
Wallendorf	377	0,24	0,501	2,089
Ferschweiler	872	0,55	1,160	2,109
Gilzem	414	0,26	0,551	2,118
Peffingen	239	0,15	0,318	2,119
Alsdorf	373	0,23	0,496	2,157
Holsthum	583	0,34	0,775	2,281
Menningen	180	0,1	0,239	2,394
Prümzurlay	541	0,27	0,719	2,665
Bollendorf	1534	0,77	2,040	2,650

Tabelle 13: Ausgangsdaten dichtbesiedelter MS-Netzmodelle

Dorf	Einwohnerzahl	Besiedelte Fläche in km ²	Maximallast $P_{\text{Ort,max}}$ in MVA	Lastdichte ρ_{Ort} in MVA/km ²
Kleinfischlingen	264	0,150	0,351	2,341
Altdorf	700	0,36	0,931	2,586
Gommersheim	1478	0,72	1,966	2,730
Böbingen	708	0,34	0,942	2,770
Burrweiler	822	0,37	1,093	2,955
Edesheim	2290	1	3,046	3,046
Weyher in der Pfalz	482	0,21	0,641	3,053
Flemlingen	394	0,17	0,524	3,082
Gleisweiler	597	0,25	0,794	3,176
Großfischlingen	632	0,25	0,841	3,362
Hainfeld	763	0,3	1,015	3,383
Roschbach	858	0,33	1,141	3,458
Rhodt unter Rietburg	1094	0,42	1,455	3,464
Venningen	940	0,32	1,250	3,907
Freimersheim (Pfalz)	972	0,33	1,293	3,917
Edenkoben	6494	2,22	8,637	3,891
Sankt Martin	1817	0,57	2,417	4,240
Maikammer	4198	1,1	5,583	5,076
Kirrweiler (Pfalz)	2070	0,43	2,753	6,403

Tabelle 12 enthält Daten der Verbandsgemeinde Irrel zur Bestimmung der Modellparameter für dünnbesiedelte ländliche MS-Netze. Die in Tabelle 13 enthaltenen Daten der Verbandsgemeinde Edenkoben/Maikammer dienen zur Modellierung dichtbesiedelter MS-Netze. Entsprechend dem Lastdichtenmodell aus Abbildung 6 wird als Ausgangspunkt zur Modellierung großer Orte der jeweils größte Ort bezüglich der Einwohnerzahl der Verbandsgemeinden Irrel (Bollendorf) und Edenkoben/Maikammer (Edenkoben) herangezogen. Zur Modellierung mittelgroßer Orte werden für die VG Irrel die fünf Orte mit einer Einwohnerzahl über 500 verwendet und für die VG Edenkoben/Maikammer die sechs Orte mit einer Einwohnerzahl über 1000. Alle weiteren Orte dienen zur Bestimmung der Parameter für kleine Orte. Da das Lastdichtenmodell „MM“ mit einem Lastzentrum in der Mitte des Netzgebiets den beiden Beispielnetzen am ähnlichsten ist wird dieses zur Bestimmung der Parameter für die ländlichen MS-Netzmodellen verwendet. Das Lastdichtenmodell enthält analog zu den städtischen Netzmodellen 25 Orte. Ausgehend von den Beispielnetzen wird die Anzahl von mittelgroßen und kleinen Orten im Verhältnis der Ortsanzahlen der Beispielnetze bestimmt.

Tabelle 14: Aufteilung der Orte nach Einwohnerzahl

MS-Netz	Anzahl der Orte			
	Gesamt	Große Orte	Mittelgroße Orte	Kleine Orte
VG Irrel	17	1	5	11
VG Edenkoben/Maikammer	19	1	6	12
Modellnetz Typ „MM“	25	1	8	16

Die theoretische Gemarkungsfläche des gesamten Netzgebietes berechnet sich durch den Abstand d zwischen zwei Nachbarorten und die Anzahl der horizontal nebeneinander oder vertikal übereinander liegenden Orte:

$$A_{\text{ges}} = (5 \cdot d)^2 \quad (20)$$

A_{ges} : Fläche des ländlichen MS-Netzmodells
 d : Abstand zwischen zwei Nachbarorten

In Tabelle 15 werden die zur Modellierung ländlicher MS-Netze benötigten Parameter zusammengefasst. Diese basieren auf den berechneten Durchschnittswerten der Beispielnetze Irrel und Edenkoben/Maikammer und werden für das Lastdichtenmodell „MM“ abgeleitet. Wesentlicher Faktor zur Bestimmung der Modellparameter ist die durchschnittliche Anzahl von 400-kVA-Ortsnetzstationen der Beispielnetze. Um größere Unterschiede zwischen dicht- und dünnbesiedelten Landnetzmodellen zu erzeugen wird für dünnbesiedelte Landnetze die Anzahl der

Ortsnetzstationen abgerundet und für dichtbesiedelte Landnetze aufgerundet. Für die Lastdichten der Orte der Modellnetze ebenfalls Werte verwendet die den Unterschied zwischen dünn- und dichtbesiedelten Netzmodellen hervorheben sollen und so ggf. von den Durchschnittswerten der Beispielnetze deutlich abweichen. Die Anzahl der Ortsnetzstationen für die Beispielnetze der VG Irrel und Edenkoben/Maikammer wird über Gleichung 7 berechnet.

Tabelle 15: Abgeleitete und berechnete Modellparameter ländlicher MS-Netze

Parameter	Modellnetz „MM“ dünnbesiedelt	VG Irrel	Modellnetz „MM“ dichtbesiedelt	VG Edenkoben/Maikammer
Größter Ort				
Anzahl der Orte	1	1	1	1
Lastdichte ρ_{Ort} der Siedlungsfläche in MVA/km ²	2	2,650	6	3,891
Einwohner	1440	1534	6480	6494
Maximallast $P_{\text{Ort,max}}$ je Ort in MVA	1,91	2,040	8,618	8,637
Anzahl der 400 kVA-Ortsnetzstationen	8	8,5	36	35,9
Mittelgroße Orte				
Anzahl der Orte	8	5	8	6
Lastdichte ρ_{Ort} der Siedlungsfläche in MVA/km ²	1,5	2,072	4,5	4,16
Einwohner	720	816	2160	2158
Maximallast $P_{\text{Ort,max}}$ je Ort in MVA	0,958	1,085	2,87	2,87
Anzahl der 400 kVA-Ortsnetzstationen	4	4,5	12	11,95
Kleine Orte				
Anzahl der Orte	16	11	16	12
Lastdichte ρ_{Ort} der Siedlungsfläche in MVA/km ²	1	1,66	3	3,17
Einwohner	180	271	720	678
Maximallast $P_{\text{Ort,max}}$ je Ort in MVA	0,239	0,359	0,958	0,901
Anzahl der 400 kVA-Ortsnetzstationen	1	1,5	4	3,75
Gesamtes Netz				
Anzahl der Orte	25	17	25	19
Ortsnetzstationen gesamt	56	47,5	196	152
Gesamte Einwohnerzahl	10080	8595	35280	27578
Maximale Gesamtlast in MVA	13406,4	11431,4	46922,4	36678,7
Minimale Gesamtlast in MVA	3351,4	2857,9	11730,6	9169,7
Wirkleistung (maximal) in MVA	8,334	7,106	29,167	22,800
Blindleistung (maximal) in Mvar	5,837	4,983	20,453	15,988
Abstände zwischen den Orten in km	2,2	2,912	1,6	2,343
Gesamtfläche des Versorgungsgebiets in km ²	121	113,37	64	159,38
Kantenlänge des Versorgungsgebiets in km	11		8	

Wesentlicher Parameter zur Bestimmung von Leitungslängen sind die Abstände zwischen den Orten. Die in Tabelle 15 aufgeführten Werte für die Beispielnetze stellen Durchschnittswerte basierend auf Messungen mittels Google Earth Pro dar. Aus diesen werden die Abstände zwischen den Orten der Netzmodelle abgeleitet. Damit die Gesamtfläche des Versorgungsgebiets des dünnbesiedelten Modells der Fläche der Verbandsgemeinde Irrel ähnelt, wird mit 2,2 km ein kleinerer Abstand zwischen den Orten gewählt als der Durchschnittswert des Beispielnetzes. Für dichtbesiedelte Landnetze wird mit 1,6 km ein deutlich kleinerer Abstand zwischen den Orten gewählt, da die Verbandsgemeinde Edenkoben/Maikammer einen großen zusammenhängenden unbesiedelten Waldanteil aufweist, der in Deutschland in diesem Umfang untypisch ist.

IV. Anordnung der Ortsnetzstationen

Die Ortsnetzstationen werden innerhalb eines Ortes in äquidistanten Abständen nahe der Ortsmitte angeordnet. Die 36 Ortsnetzstationen des größten Ortes im dichtbesiedelten Gebiet werden in drei Ringen, wie in Abbildung 7 dargestellt, angeordnet. Jeder Knoten entspricht dabei der Position einer Ortsnetzstation.

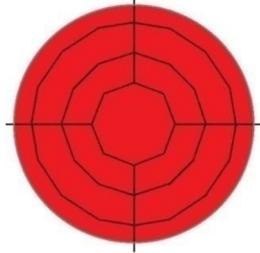


Abbildung 7: Anordnung der Ortsnetzstationen des größten Ortes eines dichtbesiedelten Landnetzes

In Tabelle 16 werden die benötigten Parameter zur Modellierung der Orte zusammengefasst. Die Anordnung der Ortsnetzstationen erfolgt analog zu Abbildung 7 in Ringen. Da kleine Orte des dünnbesiedelten Netzmodells nur eine Ortsnetzstation aufweist entfällt eine solche Anordnung.

Tabelle 16: Anordnung und Ausdehnung der Orte

Ortsgröße	Anz. Ortsstationen	Anordnung
Dünnbesiedelte Landnetze		
Größter Ort	8	Ein Ring
Mittelgroßer Ort	4	Ein Ring
Kleiner Ort	1	-
Dichtbesiedelte Landnetze		
Größter Ort	36	Drei Ringe
Mittelgroßer Ort	12	Ein Ring
Kleiner Ort	4	Ein Ring

V. Dezentrale Erzeugung in ländlichen MS-Netzmodellen

Zur Integration dezentraler Erzeuger in die ländlichen Mittelspannungsnetze wird die Annahme getroffen, auf MS-Ebene angeschlossene Anlagen ausschließlich in den Gemarkungsflächen kleiner Orte (grün) des Lastdichtenmodells zu verorten, da solche Anlagen in der Regel nicht in dichter besiedelten Gegenden installiert sind. Zur Berechnung der in den ländlichen MS-Netzmodellen zu integrierenden Windanlagen wird anhand von Gleichung 21 die Dichte von Windkraftanlagen in dünnbesiedelten Gegenden bestimmt. Als Bezugsfläche wird entsprechend der geringen Einwohnerdichte von ländlichen MS-Netzen die dünnbesiedelte Fläche Deutschlands aus Tabelle 9 angenommen. Die installierte Leistung aus Onshore-Windkraftanlage ist Tabelle 8 für das Jahr 2025 zu entnehmen. Die Berechnung der Dichte für Solaranlagen erfolgt analog.

$$\rho_{\text{inst,Wind,MS}} = \frac{P_{\text{inst,Wind,MS}}}{A_{\text{Ger,dünn}}} = \frac{37117 \text{ MW}}{237583,71 \text{ km}^2} = 0,156 \frac{\text{MW}}{\text{km}^2} \quad (21)$$

- $\rho_{\text{inst,Wind,MS}}$: Leistungsdichte der installierten Windkraft in der MS-Ebene dünnbesiedelter Gegenden in Deutschland
 $P_{\text{inst,Wind,MS}}$: Installierte Leistung angeschlossen in der Mittelspannungsebene für das Jahr 2025
 $A_{\text{Ger,dünn}}$: Fläche dünnbesiedelter Gegenden in Deutschland aus Tabelle 9

Anhand dieser Leistungsdichten kann berechnet werden wie viel Leistung aus Solar- und Windkraft in die MS-Netzmodelle integriert werden muss. Durch Multiplikation der Leistungsdichte mit der Versorgungsfläche lassen sich die im MS-Netzmodell installierten Wind- und Solarkraftanlagen bestimmen. Durch das Verhältnis der installierten Leistungen angeschlossen in der HS/MS- und MS-Ebene wird die jeweilige installierte Erzeugung dieser Spannungsebenen für die Modelle bestimmt. In Tabelle 17 werden die für das Beispiel eines MS-Netzmodells mit dem Lastdichtenmodell „MM“ bestimmten installierten Leistungen auf HS/MS- und MS-Ebene dargestellt.

Tabelle 17: Installierte Leistung dezentraler Erzeuger der MS-Netzmodelle

MS-Netz	Versorgungsfläche	Windkraft			Solarenergie		
		Installierte Leistung	HS/MS	MS	Installierte Leistung	HS/MS	MS
dünnbesiedelt	121 km ²	18,88 MW	4,44 MW	14,44 MW	8,26 MW	0,39 MW	7,87 MW
dichtbesiedelt	64 km ²	3,97 MW	0,96 MW	3,01 MW	4,37 MW	0,21 MW	4,16 MW

Diese Leistungen werden nun entsprechend Tabelle 18 in den ländlichen MS-Netzmodellen durch typischen Anlagengrößen verteilt. Diese Anlagengrößen basierend auf Durchschnittsgrößen der in Deutschland in der HS/MS- oder MS-Ebene angeschlossenen Anlagen [13].

Tabelle 18: Anzahl der in angeschlossenen Wind und Solarkraftanlagen

Spannungsebene	Anz.	Durchschn. Anlagengröße	Dünnbesiedeltes Landnetz		Dichtbesiedeltes Landnetz	
			Anlagengröße	Anlagenanzahl	Anlagengröße	Anlagenanzahl
Windkraft						
HS/MS	1060	2,67 MW	2,5 MW	2	1	1
MS	5312	2,43 MW	2 MW	6	1	3
Solkraft						
HS/MS	12	5,67 MW				
MS	398	2,75 MW	2,5	3	1,5	3

Für die installierte Windkraft in dünnbesiedelten Landnetzen werden auf HS/MS-Ebene 2,5-MW-Anlagen verwendet und auf MS-Ebene 2-MW-Anlagen, da typischerweise auf der HS/MS-Ebene größere Anlagen verbaut sind. Für dichtbesiedelte Landnetze werden mit 1 MW deutlich kleinere Anlagengrößen verwendet, da angenommen wird, dass typischerweise in dichter besiedelten Gegenden kleinere Anlagen eingesetzt werden. Bei Solaranlagen werden in dünnbesiedelten Landnetzen in der HS/MS Ebene 2,5-MW und in der MS Ebene 1,5-MW-Anlagen angeschlossen um der zu installierenden Leistung aus Tabelle 18 Rechnung zu tragen. Aufgrund der sehr geringen zu installierenden Leistung für Solarkraftanlagen der HS/MS Ebene wird auf den Anschluss einer Anlage verzichtet, zumal in Deutschland ausschließlich zwölf Anlagen auf dieser Spannungsebene installiert sind. Die Ermittlung der installierten Leistung dezentraler Erzeuger in den NS-Netzen für das Jahr 2025 erfolgt grundsätzlich über das in Abschnitt 3.VIII vorgestellte Vorgehen. Auf Basis von Gleichung 15 wird allerdings die Leistungsdichte von PV-Anlagen der besiedelten Flächen Deutschlands mit den Flächen der Orte aus Tabelle 15 multipliziert, da die restlichen Flächen der ländlichen MS-Netzmodelle als unbewohnt angenommen werden. In Tabelle 19 ist die installierte Leistung dezentraler Erzeuger je Ortsnetzstation aufgeführt.

Tabelle 19: Installierte Leistung dezentraler Erzeuger pro Ortsnetzstation in Landnetzen

Parameter	Dünnbesiedelte	Dichtbesiedelt
Größe Orte		
Besiedelte Fläche in km ²	0,955	1,436
EE-Erzeugung in MW	0,812	1,221
EE-Erzeugung je Ortsnetzstation in MW	0,102	0,034
Mittelgroße Orte		
Besiedelte Fläche in km ²	0,639	0,638
EE-Erzeugung in MW	0,543	0,542
EE-Erzeugung je Ortsnetzstation in MW	0,136	0,045
Kleine Orte		
Besiedelte Fläche in km ²	0,239	0,319
EE-Erzeugung in MW	0,203	0,271
EE-Erzeugung je Ortsnetzstation in MW	0,203	0,068

5 Auslegung der Kabel und Freileitungsquerschnitte

Die Auslegung der Kabel und Freileitungen erfolgt zum einen anhand der Netzplanungskriterien hinsichtlich der Spannungshaltung und der thermischen Auslastung und zum anderen anhand eines Katalogs mit Standardbetriebsmitteln des Netzbetreibers. Der Leitungsquerschnitt wurde aus einem Katalog mit Standardbetriebsmitteln so gewählt, dass die Netzplanungskriterien eingehalten wurden.

Zur Überprüfung des Netzplanungskriteriums der Spannungshaltung wurde eine Spannungsaufteilung der in der Norm DIN EN 50160 festgeschriebenen Spannungsverträglichkeitspegel von $\pm 10\% U_n$ über die Verteilnetzebene zu Grunde gelegt. Diese kann von Netzbetreiber zu Netzbetreiber variieren. Für den Lastfall (keine Einspeisung durch Erzeugungsanlagen) im MS-Netz wird üblicherweise mit einem zulässigen Spannungsabfall von $5\% U_n$ und $5,75\% U_n$ geplant. Im Einspeisefall (keine Last) ist der zulässige Spannungshub von 2% durch die BDEW-Mittelspannungsrichtlinie fest vorgegeben. Abbildung 8 zeigt die für diese Arbeit angesetzte Spannungsaufteilung in der Verteilnetzplanung. Der zulässige Spannungsabfall von der Sammelschiene des Umspannwerks bis zum Lastknoten beträgt $5\% U_n$.

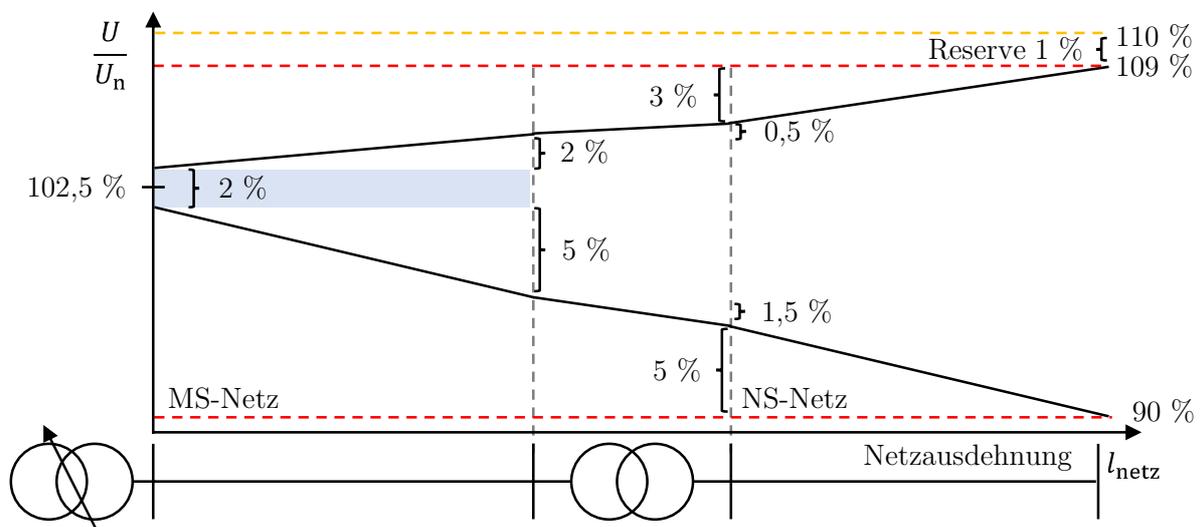


Abbildung 8: Spannungsverteilung in der Verteilnetzplanung

Zur Einhaltung des Kriteriums der thermischen Auslastung müssen in den Auslegungsfällen (Last- und Einspeisefälle) der thermische Grenzstrom I_{th} aller Komponenten (Kabel, Freileitungen, Transformatoren) eingehalten werden.

In Absprache mit einem regionalen Verteilnetzbetreiber wurden folgende Standardbetriebsmittel berücksichtigt:

- Kabelnetze:
 - NA2X(F)2Y 3x1x 240 mm² mit $I_{\text{th}} = 413$ A
 - NA2X(F)2Y 3x1x 300 mm² mit $I_{\text{th}} = 435$ A
- Freileitungsnetze:
 - F-AL 3x 120 mm² mit $I_{\text{th}} = 365$ A
 - F-AL 3x 185 mm² mit $I_{\text{th}} = 490$ A

In allen Netzen war der kleinere Querschnitt ausreichend, um die Netzplanungskriterien einzuhalten.

6 Erstellte städtische und ländliche MS-Netzmodelle

I. Strukturmerkmale der Mittelspannungsnetze

Tabelle 20: Zusammenfassung der verwendeten Strukturmerkmale

Strukturmerkmal		Stadt	Land
Spannungsebene		10 kV	20 kV
Leitungsart		Kabel	Freileitung
Leitungstyp		240 mm ² AL VPE	120 mm ² AL
Topologie		Ringnetz	Ringnetz
Max. Auslastung einer Ringhälfte		70 %	70 %
Transformatorbemessungsleistungen der Umspannstationen in MVA		25; 31,5; 40; 50; 63	12,5; 16; 25; 31,5
Transformatortyp der Umspannstationen		YNd5	YNd5
Auslastung der Transformatoren der Umspannstationen	2 Transformatoren	50 %	50 %
	3 Transformatoren	66 %	66 %
Transformatorbemessungsleistungen der Ortsnetzstationen in kVA		400; 500; 630; 800; 1260; 1600	400
Transformatortyp der Ortsnetzstationen		Dyn5	Dyn5
Auslastung der Transformatoren der Ortsnetzstationen		50 % - 80 %	60 %

II. Städtische und ländliche Beispielnetze

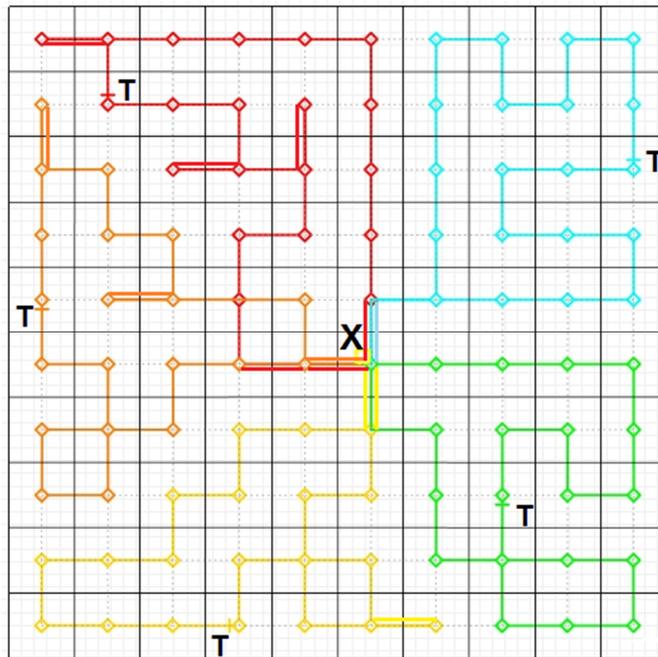


Abbildung 5-1: Beispiel für ein Stadtnetz mit 100 ONS und 5 Ringen, X: Position Umspannwerk, T: Position Trennstelle

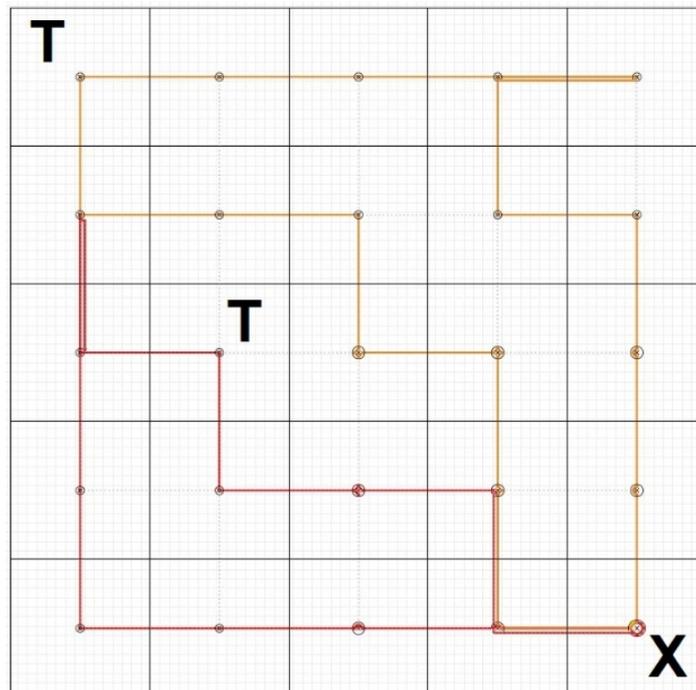
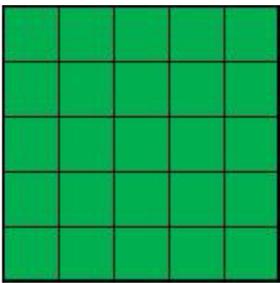
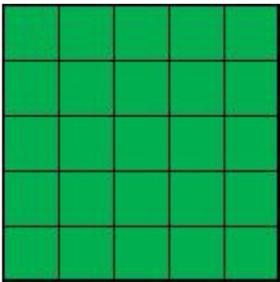
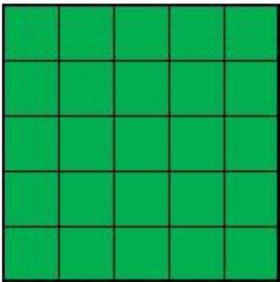
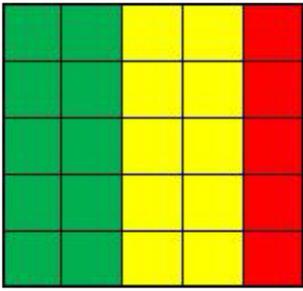
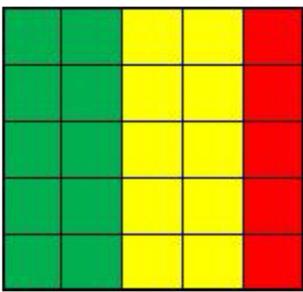
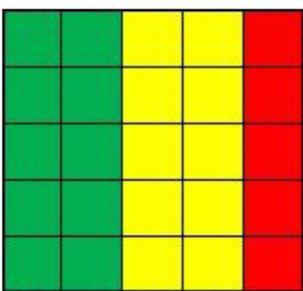
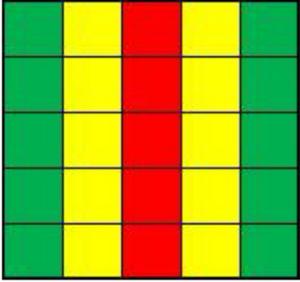
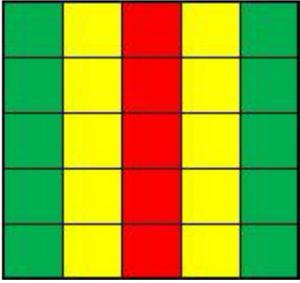
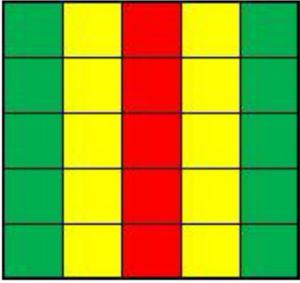


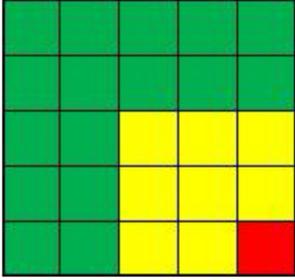
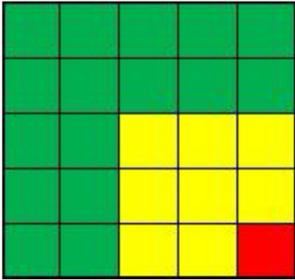
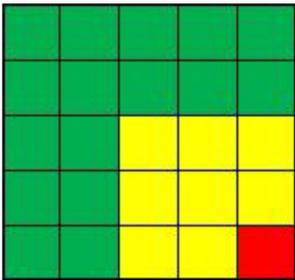
Abbildung 5-2: Beispiel für ein ländliches Netz mit 196 Ortsnetzstationen und 2 Leitungsringen (rot und orange), X: Position Umspannwerk, T: Position Trennstelle

III. Kombinationen städtischer MS-Netze

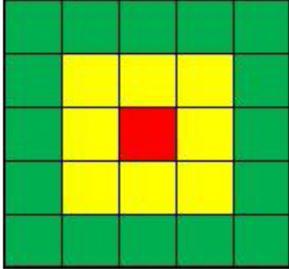
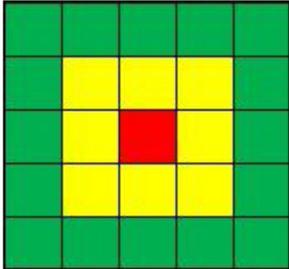
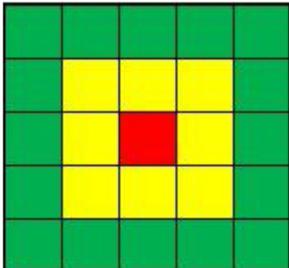
Großstadt homogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: FF	
	Lastdichten			22,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			22,5 MVA/km ²	
	Maximallast			50 MVA	
	Niedriglast			12,5 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			2 x 50 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			2,22 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			100	
	Größe eines Teilgebiets			0,089 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			298 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
	4	0,8 MVA	0,019 MW	P(max)	Q(max)
				0,450 MW	0,218 Mvar
Mittelstadt homogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: FF	
	Lastdichten			7,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			7,5 MVA/km ²	
	Maximallast			31,5 MVA	
	Niedriglast			7,88 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			2 x 31,5 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			4,20 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			100	
	Größe eines Teilgebiets			0,168 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			410 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	Auslastung	Last	
	4	0,63 MVA	0,036 MW	P(max)	Q(max)
				0,284 MW	0,137 Mvar
Kleinstadt homogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: FF	
	Lastdichten			2,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			2,5 MVA/km ²	
	Maximallast			20 MVA	
	Niedriglast			5 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			2 x 20 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			8,00 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			100	
	Größe eines Teilgebiets			0,320 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			566 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
	4	0,4 MVA	0,068 MW	P(max)	Q(max)
				0,180 MW	0,087 Mvar

Großstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: FS	
	Lastdichten			90/45/22,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			45 MVA/km ²	
	Maximallast			63 MVA	
	Niedriglast			15,75 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			3 x 31,5 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			1,40 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			80	
	Größe eines Teilgebiets			0,056 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			237 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	4	1,60 MVA	0,012 MW	1,134 MW	0,549 Mvar
	4	1,26 MVA	0,012 MW	0,567 MW	0,275 Mvar
	2	0,80 MVA	0,024 MW	0,567 MW	0,275 Mvar
Mittelstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: FS	
	Lastdichten			30/15/7,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			15 MVA/km ²	
	Maximallast			40 MVA	
	Niedriglast			10 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			2 x 40 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			2,67 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			90	
	Größe eines Teilgebiets			0,1067 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			327 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	6	0,80 MVA	0,015 MW	0,480 MW	0,232 Mvar
	4	0,80 MVA	0,023 MW	0,360 MW	0,174 Mvar
	2	0,63 MVA	0,045 MW	0,360 MW	0,174 Mvar
Kleinstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: FS	
	Lastdichten			10/5/2,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			5 MVA/km ²	
	Maximallast			31,5 MVA	
	Niedriglast			7,88 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			2 x 20 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			6,30 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			90	
	Größe eines Teilgebiets			0,252 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			502 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	6	0,63 MVA	0,036 MW	0,378 MW	0,183 Mvar
	4	0,50 MVA	0,054 MW	0,284 MW	0,137 Mvar
	2	0,40 MVA	0,107 MW	0,284 MW	0,137 Mvar

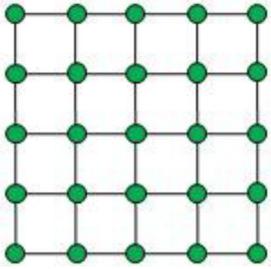
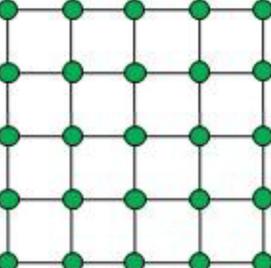
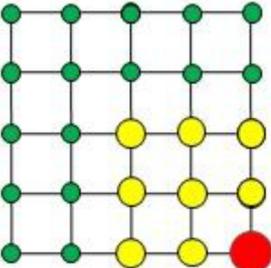
Großstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: FM	
	Lastdichten			90/45/22,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			45 MVA/km ²	
	Maximallast			63 MVA	
	Niedriglast			15,75 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			3 x 31,5 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			1,40 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			80	
	Größe eines Teilgebiets			0,056 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			237 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	4	1,60 MVA	0,012 MW	1,134 MW	0,549 Mvar
	4	1,26 MVA	0,012 MW	0,567 MW	0,275 Mvar
	2	0,80 MVA	0,024 MW	0,567 MW	0,275 Mvar
Mittelstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: FM	
	Lastdichten			30/15/7,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			15 MVA/km ²	
	Maximallast			40 MVA	
	Niedriglast			10 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			2 x 40 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			2,67 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			90	
	Größe eines Teilgebiets			0,1067 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			327 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	6	0,80 MVA	0,015 MW	0,480 MW	0,232 Mvar
	4	0,80 MVA	0,023 MW	0,360 MW	0,174 Mvar
	2	0,63 MVA	0,045 MW	0,360 MW	0,174 Mvar
Kleinstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: FM	
	Lastdichten			10/5/2,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			5 MVA/km ²	
	Maximallast			31,5 MVA	
	Niedriglast			7,88 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			2 x 20 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			8,00 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			90	
	Größe eines Teilgebiets			0,1067 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			502 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	6	0,63 MVA	0,036 MW	0,378 MW	0,183 Mvar
	4	0,50 MVA	0,054 MW	0,284 MW	0,137 Mvar
	2	0,40 MVA	0,107 MW	0,284 MW	0,137 Mvar

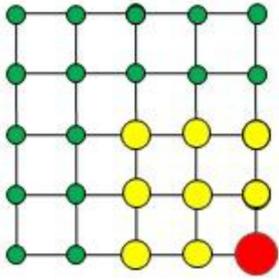
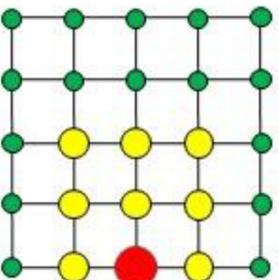
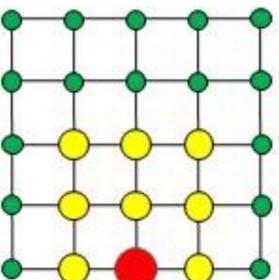
Großstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: SS	
	Lastdichten			90/45/22,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			32,4 MVA/km ²	
	Maximallast			50 MVA	
	Niedriglast			12,50 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			3 x 31,5 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			1,54 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			102	
	Größe eines Teilgebiets			0,0617 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			248 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	6	1,60 MVA	0,009 MW	0,833 MW	0,404 Mvar
	4	1,26 MVA	0,013 MW	0,625 MW	0,303 Mvar
	4	0,80 MVA	0,013 MW	0,313 MW	0,151 Mvar
Mittelstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: SS	
	Lastdichten			30/15/7,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			10,8 MVA/km ²	
	Maximallast			40 MVA	
	Niedriglast			10 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			2 x 40 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			3,70 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			104	
	Größe eines Teilgebiets			0,1481 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			385 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	8	0,80 MVA	0,016 MW	0,500 MW	0,242 Mvar
	4	0,80 MVA	0,032 MW	0,500 MW	0,242 Mvar
	4	0,63 MVA	0,032 MW	0,250 MW	0,121 Mvar
Kleinstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: SS	
	Lastdichten			10/5/2,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			3,6 MVA/km ²	
	Maximallast			25 MVA	
	Niedriglast			7,88 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			2 x 25 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			6,94 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			102	
	Größe eines Teilgebiets			0,2778 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			527 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	6	0,63 MVA	0,039 MW	0,417 MW	0,202 Mvar
	4	0,50 MVA	0,059 MW	0,313 MW	0,151 Mvar
	4	0,40 MVA	0,059 MW	0,156 MW	0,076 Mvar

Großstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: SR	
	Lastdichten			90/45/22,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			36,9 MVA/km ²	
	Maximallast			63 MVA	
	Niedriglast			15,75 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			3 x 31,5 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			1,71 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			104	
	Größe eines Teilgebiets			0,0683 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			261 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	6	1,60 MVA	0,009 MW	0,922 MW	0,447 Mvar
	4	1,26 MVA	0,015 MW	0,691 MW	0,335 Mvar
	4	0,80 MVA	0,015 MW	0,346 MW	0,167 Mvar
Mittelstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: SR	
	Lastdichten			30/15/7,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			12,3 MVA/km ²	
	Maximallast			40 MVA	
	Niedriglast			10 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			2 x 40 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			3,25 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			82	
	Größe eines Teilgebiets			0,1301 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			361 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	8	0,80 MVA	0,014 MW	0,439 MW	0,213 Mvar
	4	0,80 MVA	0,028 MW	0,439 MW	0,213 Mvar
	2	0,63 MVA	0,055 MW	0,439 MW	0,213 Mvar
Kleinstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: SR	
	Lastdichten			10/5/2,5 MVA/km ²	
	Durchschnittliche Lastdichte			4,1 MVA/km ²	
	Maximallast			25 MVA	
	Niedriglast			7,88 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation			2 x 25 MVA	
	Lage der Umspannstation			Zentral + Ecke	
	Versorgungsfläche			6,10 km ²	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen			78	
	Größe eines Teilgebiets			0,2439 km ²	
	Kantenlänge eines Teilgebiets			494 m	
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	6	0,63 MVA	0,035 MW	0,366 MW	0,177 Mvar
	4	0,50 MVA	0,052 MW	0,274 MW	0,133 Mvar
	2	0,40 MVA	0,104 MW	0,274 MW	0,133 Mvar

Großstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: MM	
	Lastdichten		90/45/22,5 MVA/km ²		
	Durchschnittliche Lastdichte		32,4 MVA/km ²		
	Maximallast		50 MVA		
	Niedriglast		12,50 MVA		
	Anzahl u. Größe der Umspannstation		3 x 31,5 MVA		
	Lage der Umspannstation		Zentral + Ecke		
	Versorgungsfläche		1,54 km ²		
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen		102		
	Größe eines Teilgebiets		0,0617 km ²		
	Kantenlänge eines Teilgebiets		248 m		
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	6	1,60 MVA	0,009 MW	0,833 MW	0,404 Mvar
	4	1,26 MVA	0,013 MW	0,625 MW	0,303 Mvar
	4	0,80 MVA	0,013 MW	0,313 MW	0,151 Mvar
Mittelstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: MM	
	Lastdichten		30/15/7,5 MVA/km ²		
	Durchschnittliche Lastdichte		10,8 MVA/km ²		
	Maximallast		40 MVA		
	Niedriglast		10 MVA		
	Anzahl u. Größe der Umspannstation		2 x 40 MVA		
	Lage der Umspannstation		Zentral + Ecke		
	Versorgungsfläche		3,70 km ²		
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen		104		
	Größe eines Teilgebiets		0,1481 km ²		
	Kantenlänge eines Teilgebiets		385 m		
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	8	0,80 MVA	0,016 MW	0,500 MW	0,242 Mvar
	4	0,80 MVA	0,032 MW	0,500 MW	0,242 Mvar
	4	0,63 MVA	0,032 MW	0,250 MW	0,121 Mvar
Kleinstadt inhomogener Lastdichte				Lastdichtenmodell: MM	
	Lastdichten		10/5/2,5 MVA/km ²		
	Durchschnittliche Lastdichte		3,6 MVA/km ²		
	Maximallast		25 MVA		
	Niedriglast		7,88 MVA		
	Anzahl u. Größe der Umspannstation		2 x 25 MVA		
	Lage der Umspannstation		Zentral + Ecke		
	Versorgungsfläche		6,94 km ²		
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen		102		
	Größe eines Teilgebiets		0,2778 km ²		
	Kantenlänge eines Teilgebiets		527 m		
Ortsnetzstation	Anzahl	Größe	EE	Last	
				P(max)	Q(max)
	6	0,63 MVA	0,039 MW	0,417 MW	0,202 Mvar
	4	0,50 MVA	0,059 MW	0,313 MW	0,151 Mvar
	4	0,40 MVA	0,059 MW	0,156 MW	0,076 Mvar

IV. Kombinationen ländlicher MS-Netze

homogenes dünnbesiedeltes Netzgebiet		Lastdichtenmodell: FF		
	Maximallast		11,97 MVA	
	Niedriglast		2,99 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation		2 x 12,5 MVA	
	Lage der Umspannstation		Zentral und Ecke	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen		50	
	Gesamteinwohnerzahl		9000	
	Versorgungsfläche		121 km ²	
	Kantenlänge des Versorgungsgebiets		11 km	
	Abstand zwischen Nachbarorten		2,2 km	
	Last je Ortsnetzstation		0,239 MVA	
Orte	Anzahl	Ortsnetzstationen	EE-Gesamt	EE je ONS
	25	1	0,203 MW	0,203 MW
homogenes dichtbesiedeltes Netzgebiet		Lastdichtenmodell: FF		
	Maximallast		23,94 MVA	
	Niedriglast		5,99 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation		2 x 25 MVA	
	Lage der Umspannstation		Zentral und Ecke	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen		100	
	Gesamteinwohnerzahl		18000	
	Versorgungsfläche		64 km ²	
	Kantenlänge des Versorgungsgebiets		8 km	
	Abstand zwischen Nachbarorten		1,6 km	
	Last je Ortsnetzstation		0,239 MVA	
Orte	Anzahl	Ortsnetzstationen	EE-Gesamt	EE je ONS
	25	4	0,271 MW	0,068 MW
inhomogenes dünnbesiedeltes Netzgebiet		Lastdichtenmodell: SS		
	Maximallast		13,41 MVA	
	Niedriglast		3,35 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation		2 x 16 MVA	
	Lage der Umspannstation		Lastzentrum und gegenüberliegende Ecke	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen		56	
	Gesamteinwohnerzahl		10080	
	Versorgungsfläche		121 km ²	
	Kantenlänge des Versorgungsgebiets		11 km	
	Abstand zwischen Nachbarorten		2,2 km	
	Last je Ortsnetzstation		0,239 MVA	
Orte	Anzahl	Ortsnetzstationen	EE-Gesamt	EE je ONS
	1	8	0,812 MW	0,102 MW
	8	4	0,543 MW	0,136 MW
	16	1	0,203 MW	0,203 MW

inhomogenes dichtbesiedeltes Netzgebiet		Lastdichtenmodell: SS		
	Maximallast		46,92 MVA	
	Niedriglast		11,73 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation		3 x 31,5 MVA	
	Lage der Umspannstation		Lastzentrum und gegenüberliegende Ecke	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen		196	
	Gesamteinwohnerzahl		35280	
	Versorgungsfläche		64 km ²	
	Kantenlänge des Versorgungsgebiets		8 km	
	Abstand zwischen Nachbarorten		1,6 km	
	Last je Ortsnetzstation		0,239 MVA	
Orte	Anzahl	Ortsnetzstationen	EE-Gesamt	EE je ONS
	1	36	1,221 MW	0,034 MW
	8	12	0,542 MW	0,045 MW
	16	4	0,271 MW	0,068 MW
inhomogenes dünnbesiedeltes Netzgebiet		Lastdichtenmodell: SM		
	Maximallast		13,41 MVA	
	Niedriglast		3,35 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation		2 x 16 MVA	
	Lage der Umspannstation		Lastzentrum und gegenüberliegende Ecke	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen		56	
	Gesamteinwohnerzahl		10080	
	Versorgungsfläche		121 km ²	
	Kantenlänge des Versorgungsgebiets		11 km	
	Abstand zwischen Nachbarorten		2,2 km	
	Last je Ortsnetzstation		0,239 MVA	
Orte	Anzahl	Ortsnetzstationen	EE-Gesamt	EE je ONS
	1	8	0,812 MW	0,102 MW
	8	4	0,543 MW	0,136 MW
	16	1	0,203 MW	0,203 MW
inhomogenes dichtbesiedeltes Netzgebiet		Lastdichtenmodell: SM		
	Maximallast		46,92 MVA	
	Niedriglast		11,73 MVA	
	Anzahl u. Größe der Umspannstation		3 x 31,5 MVA	
	Lage der Umspannstation		Lastzentrum und gegenüberliegende Ecke	
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen		196	
	Gesamteinwohnerzahl		35280	
	Versorgungsfläche		64 km ²	
	Kantenlänge des Versorgungsgebiets		8 km	
	Abstand zwischen Nachbarorten		1,6 km	
	Last je Ortsnetzstation		0,239 MVA	
Orte	Anzahl	Ortsnetzstationen	EE-Gesamt	EE je ONS
	1	36	1,221 MW	0,034 MW
	8	12	0,542 MW	0,045 MW
	16	4	0,271 MW	0,068 MW

inhomogenes dünnbesiedeltes Netzgebiet		Lastdichtenmodell: MM		
	Maximallast	13,41 MVA		
	Niedriglast	3,35 MVA		
	Anzahl u. Größe der Umspannstation	2 x 16 MVA		
	Lage der Umspannstation	Lastzentrum und gegenüberliegende Ecke		
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen	56		
	Gesamteinwohnerzahl	10080		
	Versorgungsfläche	121 km ²		
	Kantenlänge des Versorgungsgebiets	11 km		
	Abstand zwischen Nachbarorten	2,2 km		
	Last je Ortsnetzstation	0,239 MVA		
Orte	Anzahl	Ortsnetzstationen	EE-Gesamt	EE je ONS
	1	8	0,812 MW	0,102 MW
	8	4	0,543 MW	0,136 MW
	16	1	0,203 MW	0,203 MW
inhomogenes dichtbesiedeltes Netzgebiet		Lastdichtenmodell: MM		
	Maximallast	46,92 MVA		
	Niedriglast	11,73 MVA		
	Anzahl u. Größe der Umspannstation	3 x 31,5 MVA		
	Lage der Umspannstation	Lastzentrum und gegenüberliegende Ecke		
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen	196		
	Gesamteinwohnerzahl	35280		
	Versorgungsfläche	64 km ²		
	Kantenlänge des Versorgungsgebiets	8 km		
	Abstand zwischen Nachbarorten	1,6 km		
	Last je Ortsnetzstation	0,239 MVA		
Orte	Anzahl	Ortsnetzstationen	EE-Gesamt	EE je ONS
	1	36	1,221 MW	0,034 MW
	8	12	0,542 MW	0,045 MW
	16	4	0,271 MW	0,068 MW
inhomogenes dünnbesiedeltes Netzgebiet		Lastdichtenmodell: SR		
	Maximallast	16,52 MVA		
	Niedriglast	4,13 MVA		
	Anzahl u. Größe der Umspannstation	2 x 25 MVA		
	Lage der Umspannstation	zwischen Lastzentren, Lastzentrum und gegenüberliegende Ecke		
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen	69		
	Gesamteinwohnerzahl	12420		
	Versorgungsfläche	121 km ²		
	Kantenlänge des Versorgungsgebiets	11 km		
	Abstand zwischen Nachbarorten	2,2 km		
	Last je Ortsnetzstation	0,239 MVA		
Orte	Anzahl	Ortsnetzstationen	EE-Gesamt	EE je ONS
	1	8	0,812 MW	0,102 MW
	8	4	0,543 MW	0,136 MW
	16	1	0,203 MW	0,203 MW

inhomogenes dichtbesiedeltes Netzgebiet		Lastdichtenmodell: SR		
	Maximallast	58,41 MVA		
	Niedriglast	14,60 MVA		
	Anzahl u. Größe der Umspannstation	3 x 31,5 MVA		
	Lage der Umspannstation	zwischen Lastzentren, Lastzentrum und gegenüberliegende Ecke		
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen	244		
	Gesamteinwohnerzahl	43920		
	Versorgungsfläche	64 km ²		
	Kantenlänge des Versorgungsgebiets	8 km		
	Abstand zwischen Nachbarorten	1,6 km		
	Last je Ortsnetzstation	0,239 MVA		
Orte	Anzahl	Ortsnetzstationen	EE-Gesamt	EE je ONS
	1	36	1,221 MW	0,034 MW
	8	12	0,542 MW	0,045 MW
	16	4	0,271 MW	0,068 MW
inhomogenes dünnbesiedeltes Netzgebiet		Lastdichtenmodell: MR		
	Maximallast	16,52 MVA		
	Niedriglast	4,13 MVA		
	Anzahl u. Größe der Umspannstation	2 x 25 MVA		
	Lage der Umspannstation	zwischen Lastzentren, Lastzentrum und gegenüberliegende Ecke		
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen	69		
	Gesamteinwohnerzahl	12420		
	Versorgungsfläche	121 km ²		
	Kantenlänge des Versorgungsgebiets	11 km		
	Abstand zwischen Nachbarorten	2,2 km		
	Last je Ortsnetzstation	0,239 MVA		
Orte	Anzahl	Ortsnetzstationen	EE-Gesamt	EE je ONS
	1	8	0,812 MW	0,102 MW
	8	4	0,543 MW	0,136 MW
	16	1	0,203 MW	0,203 MW
inhomogenes dichtbesiedeltes Netzgebiet		Lastdichtenmodell: MR		
	Maximallast	58,41 MVA		
	Niedriglast	14,60 MVA		
	Anzahl u. Größe der Umspannstation	3 x 31,5 MVA		
	Lage der Umspannstation	Lastzentrum und gegenüberliegende Ecke		
	Gesamtanzahl der Ortsnetzstationen	244		
	Gesamteinwohnerzahl	43920		
	Versorgungsfläche	64 km ²		
	Kantenlänge des Versorgungsgebiets	8 km		
	Abstand zwischen Nachbarorten	1,6 km		
	Last je Ortsnetzstation	0,239 MVA		
Orte	Anzahl	Ortsnetzstationen	EE-Gesamt	EE je ONS
	1	36	1,221 MW	0,034 MW
	8	12	0,542 MW	0,045 MW
	16	4	0,271 MW	0,068 MW

7 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag präsentiert die Entwicklung und Dokumentation synthetischer MS-Netzmodelle. Die verwendeten Netzplanungsgrundsätze und die Methodik der Netzplanungsverfahren werden erläutert. Die Netzstrukturen und die wichtigsten Kenndaten der daraus resultierenden synthetischen MS-Netzmodelle mit je drei verschiedenen geografischen Ausdehnungen werden einzeln dargestellt.

In diesem Beitrag werden alle Informationen zur Erstellung der MS-Netzmodelle geliefert. Zur allgemeinen Verwendung werden die in diesem Beitrag dokumentierten MS-Netzmodelle für die Netzberechnungsprogramme „Matpower“ und „PSS[®]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 MS-Netzmodelle gefördert werden und auf langfristige Sicht durch die verstärkte Verwendung in der Fachwelt zu vergleichbareren wissenschaftlichen Untersuchungen führen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] D. Oeding und Oswald, B, Elektrische Kraftwerke und Netze, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2011.
- [2] W. Kaufmann, Planung öffentlicher Elektrizitätsverteilungssysteme, Berlin: VDE Verlag GmbH, 1995.
- [3] G. Hosemann, Elektrische Energietechnik: Band 3: Netze, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2001.
- [4] S. Löppen, „Strukturmerkmale zur vergleichenden Bewertung von Mittelspannungsnetzen,“ in *Aachener Beiträge zur Energieversorgung*, Aachen, Klinkenberg Verlag, 2007.
- [5] Gabler Verlag, „Gabler Wirtschaftslexikon,“ [Online]. Available: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/9180/stadt-v7.html>. [Zugriff am 14 Februar 2018].
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 42508 - Transformatoren – Ölgefüllte Leistungstransformatoren von 3 150 kVA bis 80000 kVA und Um bis 123 kV, Beuth Verlag GmbH, VDE-VERLAG GMBH, 2009.
- [7] W.-H. Wellßow, M. Weisenstein, H. Rui, H. Ma, A. Benzarti und S. Röhrenbeck, „Synthetische NS-Netzmodelle für wissenschaftliche Untersuchungen,“ 2018. [Online]. Available: https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/deliver/index/docId/5210/file/_Synthetische%20NS-Netzmodelle%20f%c3%bc%20wissenschaftliche%20Untersuchungen.pdf. [Zugriff am 23 4 2019].
- [8] Datenerhebung EEG, „EEG in Zahlen 2015,“ Bundesnetzagentur, 2015.
- [9] ENTSO-E, „TYNDP 2016 market modelling data,“ 2016.
- [10] Statistisches Bundesamt, „Land- und Forstwirtschaft, Fischerei: Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung,“ *Fachserie 3 Reihe 5.1*, Bd. Fachserie 3 Reihe 5.1, 2016.
- [11] Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz, „Statistische Berichte Rheinland-Pfalz: Bevölkerung der Gemeinden,“ Bad Ems, 2011.
- [12] Google, „Google Earth,“ [Online]. Available: <https://www.google.com/intl/de/earth/>. [Zugriff am 2011].
- [13] Bundesnetzagentur, „www.bundesnetzagentur.de,“ [Online]. Available: <https://www.bundesnetzagentur.de>. [Zugriff am 19 2 2018].