

# Strukturelle Betrachtung der Ausfallsicherheit von 110kV Modellnetzen

Michael Chochole<sup>1</sup>

Technische Universität Wien, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft,  
Gusshausstraße 25/373-1 1040 Wien, +43 / 1 / 58801 / 37301, chochole@ea.tuwien.ac.at,  
www.ea.tuwien.ac.at

## Kurzfassung:

### **Motivation und zentrale Fragestellung**

Welche Maßnahmen zur Verbesserung der Ausfallsicherheit sind in 110kV Modellnetzen aus wirtschaftlicher Sicht gesehen sinnvoll?

### **Methodische Vorgangsweise**

Betrachtet wurden Modellnetze für die Stadt bei hoher und niedriger Lastdichte. Für die ländlichen Gebiete wurden Modellnetze mit durchgehender Leitung, Ringleitung und in die Stationen eingeschlifften Leitungen untersucht.

Begonnen wurde jeweils mit der einfachsten und kostengünstigsten Ausführung des Modellnetzes um das entsprechende Gebiet zu versorgen. Sukzessive wurden jene Komponenten der Modellnetze verbessert, die die meiste ausgefallene Energie pro Jahr verursacht haben, bis schließlich ein n-1-sicheres Netz erreicht wurde.

Die Modellnetze wurden in Neplan aufgebaut und jeder einzelnen Komponente wurden Zuverlässigkeitskennwerte zugewiesen. Mit Hilfe der Zuverlässigkeitsanalyse in Neplan wurde die ausgefallene Energie eines jeden Netzes ermittelt.

### **Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

Bei den unterschiedlichen Netzen haben die Verbesserungsschritte in der Reihenfolge vom günstigsten zum teuersten wie folgt ergeben:

- Zusätzlicher 380kV Transformator
- Zusätzliche Leitung, oder Installation einer zweiten Netzeinspeisung, abhängig von der Netzkonfiguration
- Zusätzlicher 110kV Transformator in den 110kV Stationen
- Zusätzliche Sammelschiene in den 110kV Stationen

Die Verbesserungen verursachen in Abhängigkeit von der Reduktion der ausgefallenen Energie unterschiedliche Kosten. Verglichen mit den Kosten für nicht gelieferte Energie kann abgeschätzt werden welche Zusatzinvestitionen in ein Netz wirtschaftlich vertretbar sind und welche nicht. Die Installation der Doppelsammelschiene in den 110kV Stationen ist der teuerste Verbesserungsschritt und wäre erst mit Ausfallkosten, abhängig vom untersuchten Modellnetz, zwischen 275 und 730 Euro je Kilowattstunde wirtschaftlich zu vertreten. Die Installation des zweiten Transformators an der 380kV Station wäre mit

---

<sup>1</sup> Jungautor

geringeren Kosten von drei Euro je nicht gelieferte Kilowattstunde bereits wirtschaftlich vertretbar.

**Keywords:** 110kV Modellnetz, Ausfallsicherheit, Verteilnetz, Zuverlässigkeitsberechnung, Simulation

## 1 Einleitung

Die strukturelle Untersuchung von 110kV Netzen auf deren Ausfallsicherheit ist nicht so einfach möglich, da die realen Strukturen in der Regel stark vermascht und sehr weitläufig sind. Hinzu kommt noch dass die Stationen zum Beispiel mit Einfach- oder Doppelleitungen, oder von einer oder zwei Seiten mit Strom versorgt werden. Diese Inhomogenität macht es schwierig die Einflüsse der unterschiedlichen Strukturen auf die Ausfallsicherheit zu untersuchen. Für die Analyse wurden deshalb fünf Modellnetze entworfen und systematisch verbessert.

## 2 Randbedingungen für die Modellnetze

Um die Realität auf die Modellnetze umlegen zu können, wurden gewissen Annahmen und Vereinfachungen getroffen. So wurde eine homogene Verteilung der Last für die Modellnetze zu Grunde gelegt. Aus der Haushaltsdichte, dem Jahreshaushaltsstrombedarfs und dem Anteil des Haushaltsstroms am Gesamtstrombedarf wurden Lastdichten für Österreich zwischen 0,1 MVA/km<sup>2</sup> und 40 MVA/km<sup>2</sup> ermittelt. Versorgt werden alle Modellnetze von einer idealen angenommenen 380kV Doppelleitung, was dem Stand der Technik entspricht. Die Umspanner zwischen 380kV und 110kV wurden mit einer einheitlichen Leistung von 300MVA im Modellnetz realisiert. Mit dieser Leistung ist es möglich 60000 Haushalte und die Umgebende Infrastruktur mit Strom zu versorgen.

Für ländliche Gebiete wurden Lastdichten zwischen 0,1 MVA/km<sup>2</sup> und 1MVA/km<sup>2</sup> angenommen. Für die Übertragung auf der 110kV Ebene kamen Freileitungen zum Einsatz, um 18 110/20kV Stationen die als Freiluftschaltanlagen modelliert wurden zu versorgen. Die Leistung der Umspanner in den 18 Stationen sollte je 16MVA betragen.

Für die städtischen Gebiete liegt die Lastdichte zwischen 1MVA/km<sup>2</sup> und 40MVA/km<sup>2</sup>. Die Energieübertragung auf der 110kV Ebene soll im Gegensatz zum ländlichen Gebiet hier durch Kabel erfolgen. Die vier bis acht 110/10kV Stationen sind als SF6-Anlagen ausgeführt, und die in den Stationen befindlichen Transformatoren haben eine Leistung von je 40MVA.

Basis für die Zuverlässigkeitsberechnung in NEPLAN stellen die Daten der VDN-Störungsstatistik 2004 dar. Jeden in dem Modellnetz befindlichen Betriebsmittel wurden die entsprechenden Kennwerte für die Simulation zugewiesen. Im Zuge der strukturellen Untersuchung wird ausgehend vom einfachsten Netzaufbau mit Hilfe der Fehlereffektanalyse jeweils jene Netzkomponente verbessert die die meist Ausgefallene Energie pro Jahr verursacht hat.

### 3 Modellnetze

Für die Analyse der Landnetze sind drei verschiedene Strukturen entworfen und untersucht worden. Als erstes ein Netz mit durchgehenden Leitungen an denen die Stationen mit kurzen Stichleitungen angeschlossen sind wie dies in der *Abbildung 1a* dargestellt ist. Die durchgehende Leitung wird von einer Seite von der 380kV Ebene mit Energie versorgt. Das zweite Modell ist als Netz mit Ringleitungen die in die Stationen eingeschliften sind ausgeführt (*Abbildung 1b*). Als drittes Netz wurde noch ein Netz mit eingeschlifffener Leitung (*Abbildung 1c*) realisiert, bei dem die Möglichkeit einer zweiseitigen Speisung aus der 380kV Ebene zur Erhöhung der Ausfallsicherheit vorhanden ist.

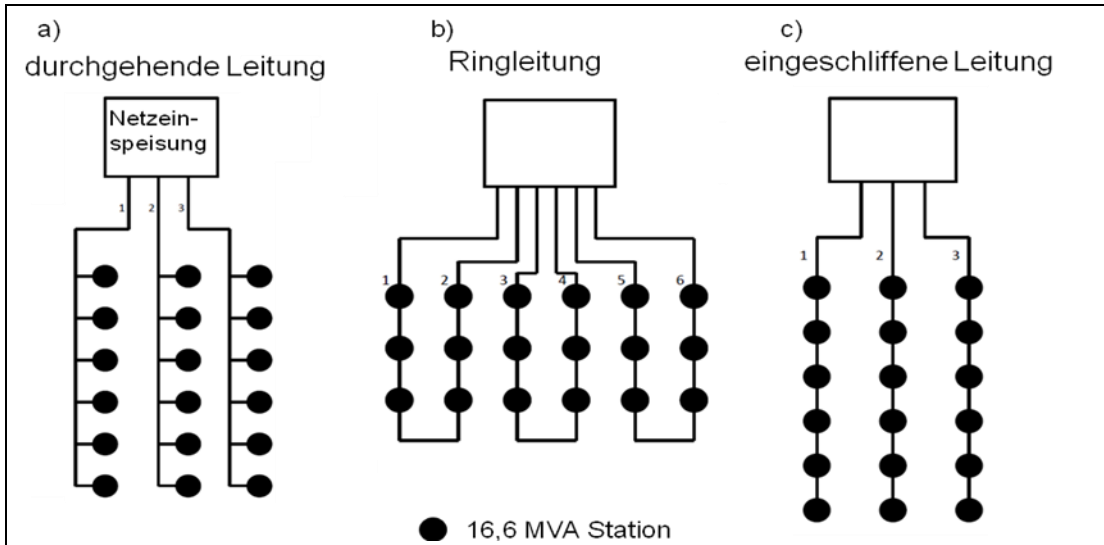


Abbildung 1: Strukturen der Landnetze

Bei der Analyse der Stadtnetze kamen nur Stationen mit eingeschlifffenen Leitungen zum Einsatz. In Gebieten mit geringer Ausdehnung wie in der Stadt ist es in der Regel möglich das Gebiet von zwei Seiten zu versorgen. Unterschieden wurde die Stadtnetze in Gebiete mit hoher Lastdichte (5-40MVA/km<sup>2</sup> *Abbildung 2b*) mit vier 110/10kV Stationen und in Gebiete mit niedriger Lastdichte (1-10MVA/km<sup>2</sup> *Abbildung 2a*) und acht 110/10kV Stationen. Für die Übertragung der elektrischen Energie kommen zwei Kabel mit einem üblichen Querschnitt von 500mm<sup>2</sup> Kupfer zum Einsatz.

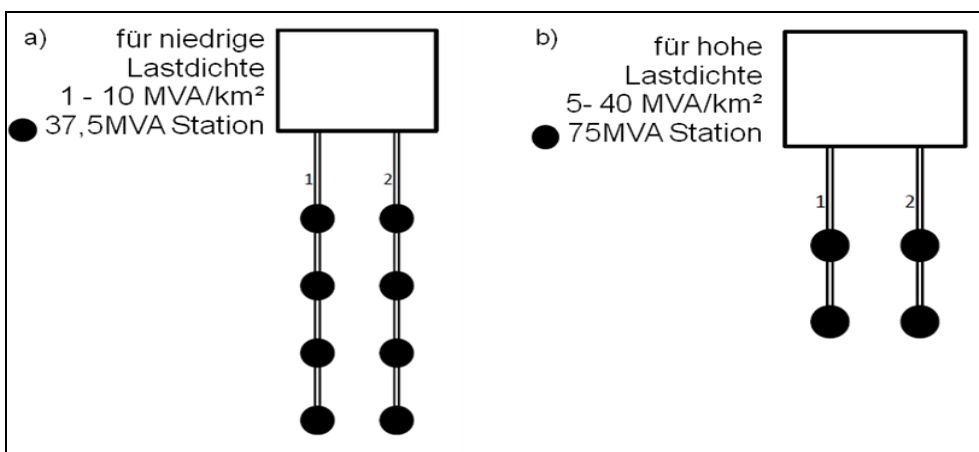


Abbildung 2: Strukturen der Stadtnetze

## 4 Simulation und Ergebnisse

Die Auswertung der Zuverlässigkeitsanalyse mit NEPLAN hat für die Modellnetze folgende Ergebnisse geliefert. Für das Landnetz mit durchgehender Leitung haben sich die Verbesserungsschritte in folgender Reihenfolge ergeben:

- Zusätzlicher 380/110kV Transformator an der Netzeinspeisung
- Ausführen der Leitung als Doppelsystem
- Zusätzlicher 110/20kV Transformator in jeder der 18 110/20kV Stationen

Für das Landnetz mit eingeschliffener Leitung fordern die Simulationsergebnisse folgende Verbesserungen der Reihe nach zu erledigen:

- Zusätzlicher 380/110kV Transformator an der Netzeinspeisung
- Installation einer zweiten Netzeinspeisung von der 380kV Ebene, um die von den Leitungsausfällen verursachte nicht gelieferte Energie zu reduzieren.
- Zusätzlicher 110/20kV Transformator in jeder 110/20kV Station
- Installation von Doppelsammelschienen in den 110/20kV Stationen anstatt der Einfachsammelschienen

Die einzelnen Verbesserungsschritte für das Landnetz mit Ringleitungen sind die gleichen wie bei dem Landnetz mit eingeschliffener Leitung nur dass der zweite Schritt wegfällt, da die Installation der zweiten Netzeinspeisung auf Grund der verwendeten Ringtopologie nicht notwendig ist.

Tabelle 1: Simulationsergebnisse Landnetze

		Grundnetz	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
Durchgehende Leitung	Kosten Mio. €	7,4	8,3	10,3	12	
	ausgef. E MWh/a	599,7	221,6	38,2	8,6	
Eingeschliffene Leitung	Kosten Mio. €	8	9	10,2	11,9	13,3
	ausgef. E MWh/a	567,9	191,7	32,6	2,3	0,4
Ringleitung	Kosten Mio. €	10	11	12,7	14,1	
	ausgef. E MWh/a	4080,9	32,6	2,3	0,4	

Für die Städtetze ergeben sich die Verbesserungsschritte unabhängig von der Lastdichte und Anzahl der Stationen wie folgt:

- Installation einer zusätzlichen Netzeinspeisung von der 380kV Ebene
- Zusätzlicher 110/10kV Transformator in jeder 110/10kV Station
- Installation von Doppelsammelschienen in den 110/10kV Stationen anstatt der Einfachsammelschienen

Im nächsten Schritt werden für jedes Szenario der Modellnetze die jährlichen Kosten ermittelt. Diese setzen sich zusammen aus der Summe der Investitionskosten, die umgelegt werden auf Annuitäten, und den Betriebskosten der einzelnen Betriebsmittel, die im Modellnetze verwendet wurden. In der Abbildung 3 sind die Kurven die sich für die Modellnetze aus der Tabelle 1 und Tabelle 2 ergeben aufgetragen.

Tabelle 2: Simulationsergebnisse Stadtnetze

		Grundnetz	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Stadtnetz	Kosten Mio. €	8,5	11,7	12,6	14,2
8 Stationen	ausgef. E MWh/a	1796	16,8	3,2	0,4
Stadtnetz	Kosten Mio. €	4,9	7,7	8,2	9,1
4 Stationen	ausgef. E MWh/a	999	42,4	3,6	0,4

Das rechte Ende der Kurven stellt die jeweils einfachste Möglichkeit dar das Netz aufzubauen. Gleichzeitig ist das auch jener Punkt mit der höchsten ausgefallenen Energie pro Jahr. Jeder Knick stellt einen Verbesserungsschritt dar, bei dem zusätzliche Komponenten das untersuchte Netz ausfallsicherer gemacht haben.

Das billigste Netz in der einfachsten Ausführung ist laut der Abbildung das Stadtnetz für hohe Lastdichte. Das liegt daran, dass nur vier Stationen und damit die geringste Anzahl an Komponenten benötigt werden, und nur kurze Kabelstrecken für den Energietransport benötigt werden.

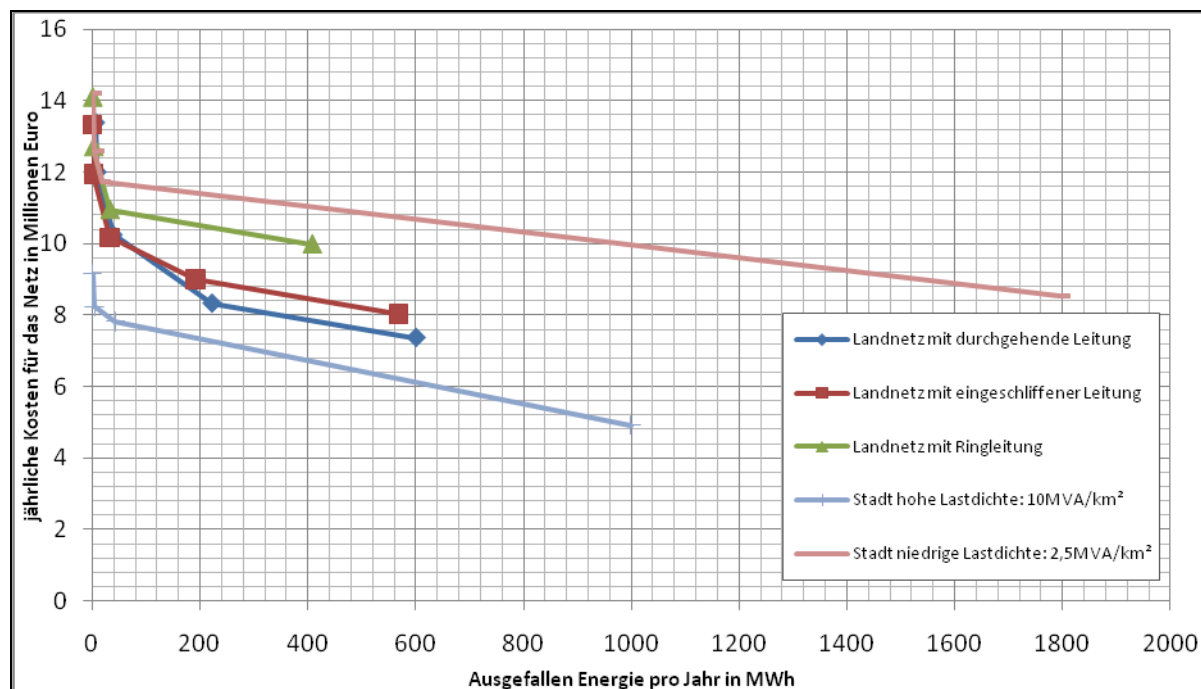


Abbildung 3: Kosten verglichen mit ausgefallener Energie

Bei den Landnetzen ist im einfachsten Fall jenes mit der durchgehenden Leitung das günstigste bei der Betrachtung der jährlichen Kosten. Erst nach der Installation der zusätzlichen Transformatoren in den Stationen bringt die eingeschliffene Leitung einen Vorteil gegenüber der durchgehenden Leitung im Vergleich von Kosten zu Ausfallsdauer. Eine hohe Ausfallsicherheit am Land ist nur mit Modellen mit eingeschliffener Leitung zu erreichen, da das Netz mit einer durchgehenden Leitung aufgrund der großen durchgehenden Leitungslänge nicht diese Sicherheit erreichen kann. Das Netz mit der Ringleitung verursacht wegen der etwas größeren Leitungslänge auch höhere Kosten, stellt aber eine in Summe

sicherere Versorgung als jenes Netz mit der durchgehenden Leitung dar, sollte das Gebiet nur von einer Seite aus mit elektrischer Energie versorgt werden können.

Bei dem Stadtnetz für niedrige Lastdichte fällt im einfachsten Fall die relativ hohe ausgefallene Energie pro Jahr auf. Das liegt an der Länge der verwendeten Kabel, die zwar nicht so oft ausfallen wie Freileitungen, aber im Falle eines Ausfalls sehr hohe Ausfallsdauern verursachen.

Wird nun die Reduktion der ausgefallenen Energie und die Kosten für die einzelnen Verbesserungsschritte ermittelt so ergeben sich Werte für die Erhöhung der Ausfallsicherheit denen entsprechende Kosten der nicht gelieferten Kilowattstunde gegenüberstehen sollten. Die Werte dafür sind der Tabelle 3 aufgelistet.

*Tabelle 3 Kosten für die Reduktion der ausgefallenen Energie*

	2. Trafo an der Netzeinspeisung	Zusätzliche Netzeinspeisung / Leitungsdoppelsystem	2. Trafo in den 110kV Stationen	Doppelsammelschiene in 110kV Stationen
Land, durchgehende L.	2,6	10,5	59,7	
Land, eingeschliffene L.	2,6	7,4	58,3	733
Land, Ringleitung	2,6		58,3	733
Stadt, niedrige Lastdichte		1,5	62,2	584
Stadt, hohe Lastdichte		2,8	10,9	275

## 5 Analyse

Zu erkennen ist, dass im ersten Schritt die Versorgung der 110kV Stationen verbessert werden soll, da dies die meiste Verbesserung der Ausfallsicherheit bringt, und auch bezogen auf die nicht gelieferte Kilowattstunde die geringsten Kosten verursacht. Die Installation eines zweiten Transformators in den 380kV Stationen ist nur bei den Landnetzen als erster Schritt sinnvoll, da bei den Stadtnetzen die Kabel eine so hohe Menge an ausgefallener Energie produzieren, dass es notwendig ist im ersten Schritt die Folgen der Kabelausfälle zu minimieren. Dies wurde im Modellnetz durch die Installation einer zweiten Einspeisung am gegenüberliegenden Ende der offenen Kabelstränge realisiert. Bei den Landnetzen mit durchgehender Leitung wurde erst im zweiten Verbesserungsschritt eine zweite Netzeinspeisung notwendig, um die Folgen der Freileitungsausfälle zu kompensieren. Bei dem Landnetz mit durchgehender Leitung wurde zur Verbesserung der Ausfallsicherheit zu der vorhandenen Leitung eine zweite parallel installiert. Diese Maßnahmen verursachen jährliche Kosten in der Höhe von 2,4 bis 10,5 Euro pro nicht ausgefallene Kilowattstunde. Mit durchschnittlichen Ausfallkosten von ungefähr acht Euro pro Kilowattstunde sind diese Maßnahmen zur Verbesserung der Versorgungssicherheit wirtschaftlich gesehen sinnvoll.

Die Verbesserungen in den Stationen verursachen deutlich höhere Kosten für eine weitere Erhöhung der Ausfallsicherheit pro Kilowattstunde. Als erster Schritt sollte ein zusätzlicher Transformator in jeder Station installiert werden. In dem Stadtnetz für hohe Lastdichte sind in jeder der vier Stationen zwei Transformatoren untergebracht. Sollte einer der Umspanner ausfallen, ist ein zusätzlicher Trafo je Station notwendig. Bei den anderen Modellnetzen ist in

jeder Station nur ein Umspanner vorhanden, und somit ist es notwendig in jeder Station einen zusätzlichen Transformator zu installieren. Das erklärt den großen Unterschied zwischen 10 Euro pro Kilowattstunden beim Stadtnetz für hohe Lastdichte und den anderen Modellnetzen mit rund 60 Euro pro Kilowattstunde.

Der letzte Verbesserungsschritt betrifft die Erhöhung der Ausfallsicherheit an den Einfachsammlerschienen in den 110kV Stationen. In diesem Fall ist dieser Verbesserungsschritt bei dem Stadtnetz für hohe Lastdichte am günstigsten, weil die Anzahl der Stationen und damit die Anzahl der Schaltfelder geringer ist, als bei den anderen Modellnetzen. Die zusätzlichen jährlichen Kosten für diese Verbesserung bezüglich der Ausfallsicherheit verursachen sehr hohe Kosten. Bei der vor der Zusatzinvestition bei einer ohnehin schon sehr hohen Ausfallsicherheit ist es fraglich ob diese Verbesserung wirtschaftlich gesehen Sinn machen würde. Dies hängt von den Anforderungen an die Energieversorgung der angeschlossenen Verbraucher ab. Bei dem Landnetz mit durchgehender Leitung sind keine Werte eingetragen weil nach der Installation der zusätzlichen Transformatoren die Leitungen jenes Element wäre, das verbessert werden sollte. Bei einer vorhandenen Doppelleitung gibt es aber keine wirtschaftlich vertretbaren Möglichkeiten zur Erhöhung der Ausfallsicherheit. Die Installation der Doppelsammlerschienen würde Kosten in der Höhe von 464 Euro pro Kilowattstunde verursachen.

Als Beispiel für die Kosten eines Ausfalles wurde hier eine überschlagsmäßige Berechnung für eine Bürogebäude durchgeführt: In einem Bürogebäude kann auch eine kurze Unterbrechung dazu führen, dass relativ hohe Kosten entstehen. Die Arbeit wird fast ausschließlich am PC erledigt, und nicht gespeicherte Daten würden verloren gehen. Die Kosten für eine nicht gelieferte Kilowattstunde wurden mit folgender Annahme ermittelt: 50 Euro Lohnkosten für den Angestellten pro Stunde, und einem Stromverbrauch eines Computerarbeitsplatzes liegt bei geschätzten 150W. Dadurch würden Kosten in der Höhe von 333 Euro für jede nicht gelieferte Kilowattstunde für den Arbeitgeber entstehen. Damit wäre die Installation von Doppelsammlerschienen in Stadtnetzen für hohe Lastdichte wirtschaftlich betrachtet sinnvoll. In den anderen Modellnetzen wäre dieser Verbesserungsschritt erst mit höheren Ausfallkosten wirtschaftlich zu vertreten.

Der Vollständigkeit halber sind die sicheren Netze in der Stadt für hohe Lastdichte (*Abbildung 4a*) und das Landnetz mit eingeschlifffener Leitung (*Abbildung 4b*) auf Mehrfachausfälle untersucht worden. Dabei wurde Wert darauf gelegt, dass jede Station von mindestens drei Seiten versorgt werden kann. Bei der Untersuchung auf Einfachausfälle ergaben sich in beiden Modellnetzen eine Verschlechterungen der Ausfallsicherheit. Dies wurde hervorgerufen durch die zusätzlichen Komponenten die dem Netz hinzugefügt wurden. Bei der Untersuchung auf Mehrfachausfälle hat sich das Stadtnetz für hohe Lastdichte mit den zusätzlichen Verbindungen als sicherer erwiesen als jenes ohne der dreiseitigen Einspeisungen der Stationen. Wird der finanzielle Aufwand für die zusätzlichen Komponenten in Relation zu der Verbesserung der Ausfallsicherheit gesetzt so entstehen Kosten von fast 5000 Euro pro Kilowattstunde, die nicht mehr ausfällt auf Grund der dreiseitigen Versorgung der Stationen in der Stadt. Die Zuverlässigkeitsberechnung für die Einfach- und Mehrfachausfälle für das Landnetz mit der vermaschten Struktur hat schlechtere Ergebnisse geliefert als ohne Vermaschung. Damit ist es nicht möglich die

Ausfallsicherheit bei dem Modellnetzen für das ländliche Gebiet im Gegensatz zu dem Modellnetz für städtische Gebiete durch zusätzliche Leitungen zu erhöhen.

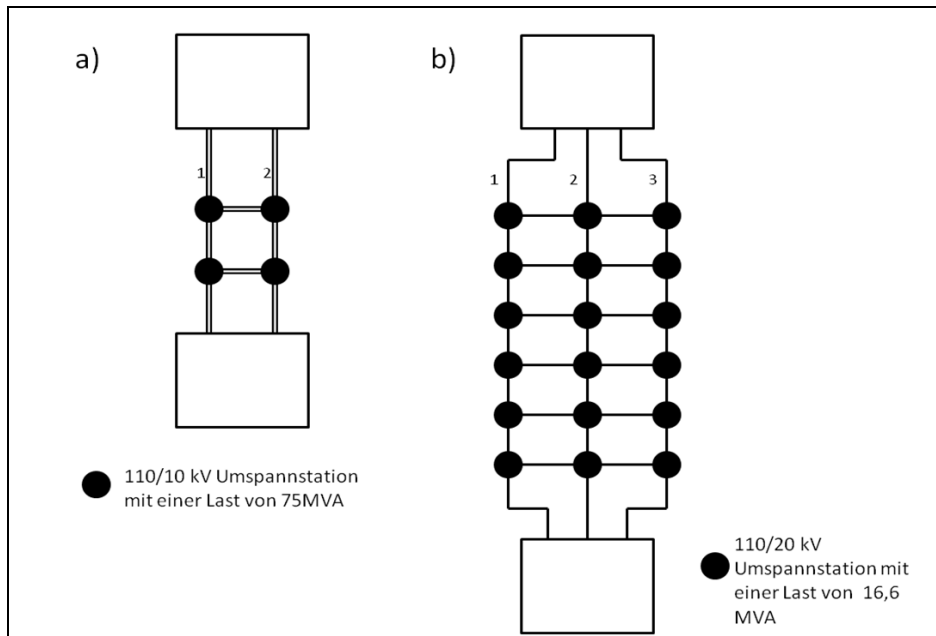


Abbildung 4: Vermaschte Netze

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die n-1-Sicherheit auf der 110kV Ebene eine ausreichende Sicherheit darstellt. Wobei die Verwendung von Doppelsammelschienen in den Stationen nur mit Ausfallkosten je nach Modellnetz zwischen 275 und 733 Euro je Kilowattstunde wirtschaftlich zu vertreten wäre. Die Vermaschung Modellnetzstrukturen hat sich zum Teil als konterproduktiv für die Versorgungssicherheit herausgestellt, oder wäre wirtschaftlich betrachtet bei den Stadtnetzen nur mit sehr hohen Ausfallkosten von 5000 Euro je Kilowattstunde zu überlegen.

#### Literatur

- [1] M. Chochole, Ausfallsicherheit von 110kV Modellnetzen, TU Wien, 2010
- [2] M. Obergünner, M. Schwan, Ermittlung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsberechnung aus der VDN-Störungsstatistik, 2004
- [3] G. Krause, Hilfsblätter zur Vorlesung Energiewirtschaft Teil 5, 2007
- [4] M. Bliem, Eine makroökonomische Bewertung zu den Kosten eines Stromausfalls im österreichischen Versorgungsnetz, 2005