

Erhöhte Belastbarkeit von MS-Netzen durch Trennstellenoptimierung im Fehlerfall

Simon KREUTMAYR^{*1}, Christoph J. STEINHART¹, Michael FINKEL¹

Christian GUTZMANN², Rolf WITZMANN³, Florian SAMWEBER⁴

¹ Hochschule Augsburg, An der Hochschule 1, 86161 Augsburg,
+49 821 4486-3634, simon.kreutmayr@hs-augsburg.de, www.hs-augsburg.de

² SWM Infrastruktur GmbH & Co. KG, Emmy-Noether-Straße 2, 80992 München,
+49 89 2361-9082, gutzmann.christian@swm-infrastruktur.de, www.swm-infrastruktur.de

³ Technische Universität München, Theresienstraße 90, 80333 München,
+49 89 289-22002, rolf.witzmann@tum.de, www.een.ei.tum.de

⁴ Stadtwerke Augsburg Holding GmbH, Hoher Weg 1, 86152 Augsburg,
+49 821 6500-8000, florian.samweber@sw-augsburg.de, www.sw-augsburg.de

Kurzfassung:

Die steigende Anzahl von elektrischen Verbrauchern wie Elektrofahrzeuge und elektrische Wärmeerzeuger erfordern zusätzliches Aufnahmepotential in den Stromverteilnetzen. Durch die zunehmende Automatisierung von Mittelspannungsschaltanlagen und die Installation von Messequipment können neue Betriebskonzepte umgesetzt werden, die eine höhere Belastbarkeit von Mittelspannungsnetzen zulassen. Das vorgestellte Betriebskonzept der Trennstellenoptimierung sieht zusätzliche Schalthandlungen im (n-1)-Fall in Mittelspannungsringen mit Mittelsehne vor. Die Optimierung wurde bisher auf Grund der zusätzlichen, manuellen Schalthandlungen und fehlender Informationen zum Lastfluss nicht durchgeführt. Die Last der Ortsnetzstationen im Ring kann mit der Trennstellenverschiebung im (n-1)-Fall gleichmäßiger aufgeteilt und das Mittelspannungsnetz im Normalbetrieb stärker belastet werden. Mit Hilfe eines Simulationsmodells wird das zusätzliche Aufnahmepotential und relevante Einflussfaktoren der Trennstellenoptimierung im Fehlerfall mit realen Netzdaten untersucht. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und die Auseinandersetzung mit der steigenden Komplexität bei der praktischen Umsetzung des Konzeptes ergänzen die Arbeit.

Keywords: Ringtopologie, Mittelsehne, Trennstellenoptimierung, (n-1)-Kriterium, 3-Punkt-Automatisierung, städtisches MS-Netz, Lastanstieg, Sektorenkopplung

1 Motivation

Die Energiewende sowie die damit verbundene Sektorenkopplung von Strom, Wärme und Verkehr wird zu einer erhöhten Belastung der Stromverteilnetze führen. Für die Netzintegration der hinzukommenden Technologien wie Elektrofahrzeuge und elektrische Wärmeerzeuger wurde unter anderem die Strombelastbarkeit von Mittelspannungskabeln (MS-Kabeln) im städtischen Verteilnetz als Engpass identifiziert. [1] Die verfügbaren, innovativen Maßnahmen als Alternative zum konventionellen Netzausbau wirken primär Spannungsbandverletzungen entgegen [2]. Mit der Trennstellenoptimierung im Fehlerfall wird deshalb eine innovative Vorgehensweise zur Erhöhung der Strombelastbarkeit von MS-Netzen untersucht.

Das Planungs- und Betriebskonzept von MS-Netzen sieht eine (n-1)-sichere Versorgung von Verbrauchern vor, wofür eine Reserve im Normalbetrieb vorgehalten werden muss. [3] In städtischen Verteilnetz wird die (n-1)-sichere Versorgung meist durch die Ringtopologie gewährleistet. Der Ring wird im Normalbetrieb mit Hilfe einer Trennstelle im Lastzentrum betrieben. Dadurch ergeben sich folglich zwei möglichst leistungsgleiche und unabhängige Halbringe. Bei einem ungünstigen Kabelfehler, zum Beispiel in der Anfangskabelstrecke, muss der gesamte Ring von einer Seite versorgt werden. Dabei ist im untersuchten Netz über einen begrenzten Zeitraum eine Belastung der MS-Kabel mit bis zu 130 % zulässig. Für den Normalbetrieb im Halbring resultiert daraus eine maximale Kabelauslastung von 65 %.

Im untersuchten Netzgebiet sind die MS-Netze häufig auch als Ring mit zusätzlicher Mittelsehne ausgeführt. Die Mittelsehne verbindet typischerweise das Lastzentrum im Ring mit dem Umspannwerk und entlastet somit die beiden Halbringe. Im Normalbetrieb wird die Last durch zwei Trennstellen auf drei möglichst leistungsgleiche Segmente aufgeteilt. Die drei resultierenden Stränge werden jeweils als Strahlennetz betrieben (Abbildung 1 mit initialen Trennstellen).

Das aktuelle Planungs- und Betriebskonzept des Netzbetreibers, zur Entstörung eines Kabelfehlers in MS-Ringen mit Mittelsehne, sieht möglichst wenig Schalthandlungen vor, da diese innerhalb des Netzes bisher manuell durchgeführt werden müssen. Somit bleibt eine der beiden Trennstellen an ihrem Ursprungsort. Die andere Trennstelle wird zusammen mit einer zusätzlichen Trennstelle so platziert, dass das fehlerbehaftete Kabel freigeschaltet werden kann.

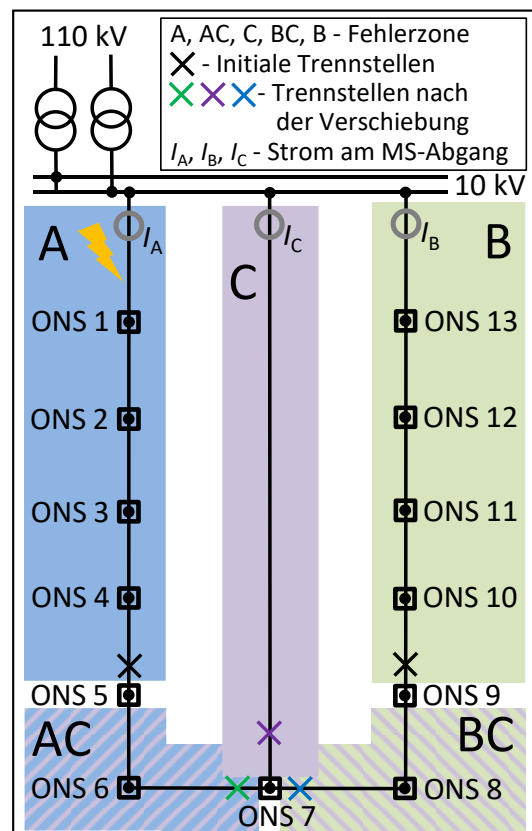


Abbildung 1: Betriebsführung an einem Mittelspannungsring mit Mittelsehne

Bei dem in Abbildung 1 dargestellten MS-Ring mit Mittelsehne würde bei einem Kabelfehler zwischen dem MS-Abgangsfeld A und Ortsnetzstation (ONS) 1, ONS 1 bis ONS 9 über das Abgangsfeld C versorgt werden. Abgangsfeld B bleibt im Normalbetrieb unberührt. Bei maximaler Auslastung des MS-Netzes werden im angenommenen Szenario, nach der Freischaltung des Fehlers, die MS-Kabel an Abgangsfeld C mit bis zu 130 % belastet. Die Kabel an Abgangsfeld B übersteigen dabei eine Auslastung von 65 % nicht.

2 Methodische Vorgehensweise

Die zunehmende Automatisierung der Verteilnetze ermöglicht die Optimierung des bisherigen Entstörungskonzeptes, um die Belastbarkeit der Netze zu erhöhen. Dabei werden die initialen Trennstellen im (n-1)-Fall so verlagert, dass sich die Last gleichmäßig auf die fehlerfreien Abgänge aufteilt (Abgang C: ONS 1 bis 7, Abgang B: ONS 8 bis 13) und die MS-Kabel an beiden Abgängen mit bis zu 130 % des Nennstroms belastet werden können. Dadurch kann die versorgbare Last im Normalbetrieb erhöht werden. Bei idealer Lastaufteilung kann im Normalbetrieb theoretisch eine maximale Auslastung der MS-Kabel an den drei Abgängen von 87 % ($87\% = (2 \cdot 130\%) / 3$) anstatt bisher 65 % erreicht werden. Wie gut die Methode an realen Netzen funktioniert, hängt davon ab, wie ideal die Mittelsehne im Lastzentrum liegt, sich die Last der ONS im Ring durch Schaltheandlungen aufteilen lässt und wie homogen die verlegten Kabeltypen sind.

Die Vorgehensweise bei der Trennstellenoptimierung ist abhängig vom Fehlerort und wird in Abbildung 1 mit Hilfe von fünf Fehlerzonen A, AC, C, BC und B dargestellt. Für einen Kabelfehler mit Abschaltung in Zone A (blau) zwischen ONS 1 und 2 wird nachfolgend die Vorgehensweise beschrieben:

1. Fehlerortung und Freischaltung der betroffenen Kabelverbindung (zwischen ONS 1 und 2)
2. Wiederversorgung von ONS 1 durch Zuschaltung des betroffenen Abgangsfeldes A
3. Lastverlagerung durch Verschiebung der Trennstelle an ONS 9 nach ONS 7 in Zone BC
4. Wiederversorgung der anderen ONS in Zone A durch schließen der Trennstelle bei ONS 5

Die Wiederversorgung aller ONS bei einem Fehler in Zone A läuft wie im vorhergehenden Beispiel immer gleich ab, wobei sie sich durch die Freischaltung der vom Fehler betroffenen Leitungsverbindung im 1. Schritt unterscheiden kann. Sollte der Fehler in einer anderen Zone auftreten, ist die dafür notwendige Vorgehensweise für alle Fehlerzonen in Tabelle 1 beschrieben.

Tabelle 1: Vorgehensweise bei der Trennstellenoptimierung im Fehlerfall an MS-Ringen mit Mittelsehne

Vorgehensweise in 4 Schritten:	Fehlerzone	A	AC	B	BC	C
1. Fehlerortung und Freischaltung der betroffenen Kabelverbindung durch zwei Trennstellen		Abhängig von der betroffenen Kabelverbindung				
2. Wiederversorgung des betroffenen Abgangsfeldes , wenn der Fehler nicht direkt nach dem Abgang liegt		A	C	B	C	#
3. Lastverlagerung an den beiden nicht betroffenen Abgängen durch Verschiebung der Trennstelle z.B. von ONS 9 nach ONS 7 in Zone BC \cong 9 \rightarrow 7 BC		9 \rightarrow 7 BC	#	5 \rightarrow 7 AC	#	V ₁ : 9 \rightarrow 7 BC oder V ₂ : 5 \rightarrow 7 AC
4. Wiederversorgung der restlichen ONS des betroffenen Netzstrangs durch Schließen der Trennstelle		5	5	9	9	V ₁ : 5 oder V ₂ : 9

Bei einem Fehler in Zone AC oder BC ist keine Lastverlagerung und deshalb im 3. Schritt keine Handlung (#) notwendig. Gleiches gilt für die Wiederversorgung im 2. Schritt bei einem Fehler in Zone C. Bei der Lastverlagerung im 3. Schritt von Zone C kann zwischen Variante V_1 und V_2 gewählt werden.

3 Untersuchung an realen MS-Netzen

Die Wirksamkeit der Trennstellenoptimierung im Fehlerfall wird in einem Simulationsmodell mit Netzdaten von 46 realen Mittelspannungsnetzen im städtischen Bereich untersucht. Die Netze gliedern sich in 17 bestehende Netzringe mit Mittelsehne und 29 Netzringe, die um eine Mittelsehne im Modell erweitert werden. Die Mittelspannungsringe haben eine Länge zwischen 1,2 km und 15,6 km sowie eine Anzahl von 7 bis 28 ONS.

Ziel der Untersuchung ist, das Aufnahmepotential für Lasten im Mittelspannungsnetz bei konventioneller und trennstellenoptimierter Entstörung in Ringen mit Mittelsehne zu vergleichen. Die Vorgehensweise bei der Untersuchung basiert auf der in [1] beschriebenen Methode. Es gelten die nachfolgenden Randbedingungen:

- Diese Betriebsmittel werden im Simulationsmodell modelliert:
 - MS-Sammelschiene im Umspannwerk (Netzebene 4)
 - MS-Kabel (Netzebene 5)
 - MS-Sammelschiene in ONS (Netzebene 6)
 - Transformator MS/NS in ONS (Netzebene 6)
 - NS-Sammelschiene in ONS (Netzebene 6)

Die Schaltzustände im MS-Netz unterscheiden sich je nach Untersuchungs- und Versorgungsfällen, die in Abbildung 2, 3 und 5 genauer beschrieben werden.

- An die MS-Sammelschiene im Umspannwerk wird ein Slack-Knoten mit einer Spannung $U = 10,1$ kV angelegt. Dieser Spannungswert ergibt sich aus dem Sollwert der Spannung U an der MS-Sammelschiene im Umspannwerk, die in Bezug auf die Nennspannung U_n (10 kV) einen Wert von $U/U_n = 102,5$ % annehmen sollte [2]. Unter Berücksichtigung der Regeltoleranz des Transformatorstufenschalters HS/MS von $\pm 1,5$ % ergibt sich für die Untersuchung in lastdominierenden Netzen eine minimale Spannung von $U/U_n = 101,0$ %.
- An die NS-Sammelschienen in den ONS werden jeweils Lastmodelle angeschlossen, die keine Spannungsabhängigkeit aufweisen. Die einzelnen NS-Lasten innerhalb eines MS-Rings sind gemeinsam skalierbar und entsprechen bei 100 % jeweils der installierten Transformatorscheinleistung S_T in der ONS. Bei der Skalierung verändern sich die NS-Lasten somit proportional zur aktuell installierten Transformatorleistung in den ONS. Es wird eine symmetrische Belastung und ein konstanter Wirkleistungsfaktor $\cos(\varphi) = 0,98$ angenommen.

Im Simulationsmodell erfolgen Lastflusssimulationen, bei denen die NS-Lasten schrittweise hochskaliert (1 % Schrittweite) werden, bis es zur Überschreitung einer der beiden Grenzwerte kommt:

- In Anlehnung an [2] wird ein maximal zulässiger Spannungsabfall im MS-Netz von 5 % auf minimal $U/U_n = 96$ % angesetzt.

- Es wird angenommen, dass die MS-Kabel das Betriebsmittel mit der schwächsten Strombelastbarkeit sind, wofür im (n-1)-Fall eine Belastung mit bis zu 130 % des Nennstroms zulässig ist.

Der bei der ersten Grenzwertüberschreitung ermittelte Skalierungsfaktor $S/S_{inst.}$ dient als Vergleichsgröße zwischen dem konventionellen und dem trennstellenoptimierten Entstörungskonzept. S ist hierbei die Summe aller NS-Lasten bei entsprechendem Skalierungsfaktor. Die installiert Leistung $S_{inst.}$ ist die Summe der Transformatornennleistungen S_T (mit der Anzahl n) aller ONS im Ring ($S_{inst.} = \sum_{i=1}^n S_T(i)$).

Abhängig vom Aufbau des betrachteten MS-Rings und dem Fehlerort kann eine hohe Anzahl an möglichen Schaltzuständen auftreten. Hierbei muss der ungünstigste Versorgungsfall mit der geringsten versorgbaren Leistung S bzw. dem geringsten Skalierungsfaktor $S/S_{inst.}$ für die Netzplanung herangezogen werden. Um den Untersuchungsaufwand zu reduzieren, werden die drei ungünstigsten Fehlerorte für die Wiederversorgung betrachtet. Diese liegen in einem der beiden Kabelanfangsstrecken im Ring bzw. in der Mittelsehne. Für die drei Fehlerorte ergeben sich vier ungünstige Versorgungsfälle, da bei einem Fehler in der Mittelsehne die Versorgung von den beiden anderen Abgängen möglich ist. Für die vier Versorgungsfälle wird der Versorgungsfall mit dem kleinsten Skalierungsfaktor bzw. der kleinsten versorgbaren Leistung ermittelt.

Der Unterschied bei der Betrachtung der konventionellen und der optimierten Entstörung liegt in der Lage der Trennstelle im (n-1)-Fall, die die Last der ONS auf die beiden fehlerfreien Abgänge aufteilt. Bei der konventionellen Entstörungsmethode bleibt eine initiale Trennstelle an ihrem Ursprungsort, bei der optimierten Entstörung wird sie zur zentralen ONS verschoben, in die die Mittelsehne mündet. In Abbildung 2 sind die vier ungünstigsten Versorgungsfälle A_C, C_A, C_B, B_C bei der konventionellen Wiederversorgung dargestellt. Für diese Versorgungsfälle wird die maximal versorgbare Leistung $S_{k_{A_C}}$, $S_{k_{C_A}}$, $S_{k_{C_B}}$ und $S_{k_{B_C}}$ ermittelt, wovon der Fall mit dem geringsten Aufnahmepotential als Vergleichsgrundlage S_k für das optimierte Entstörungskonzept dient.

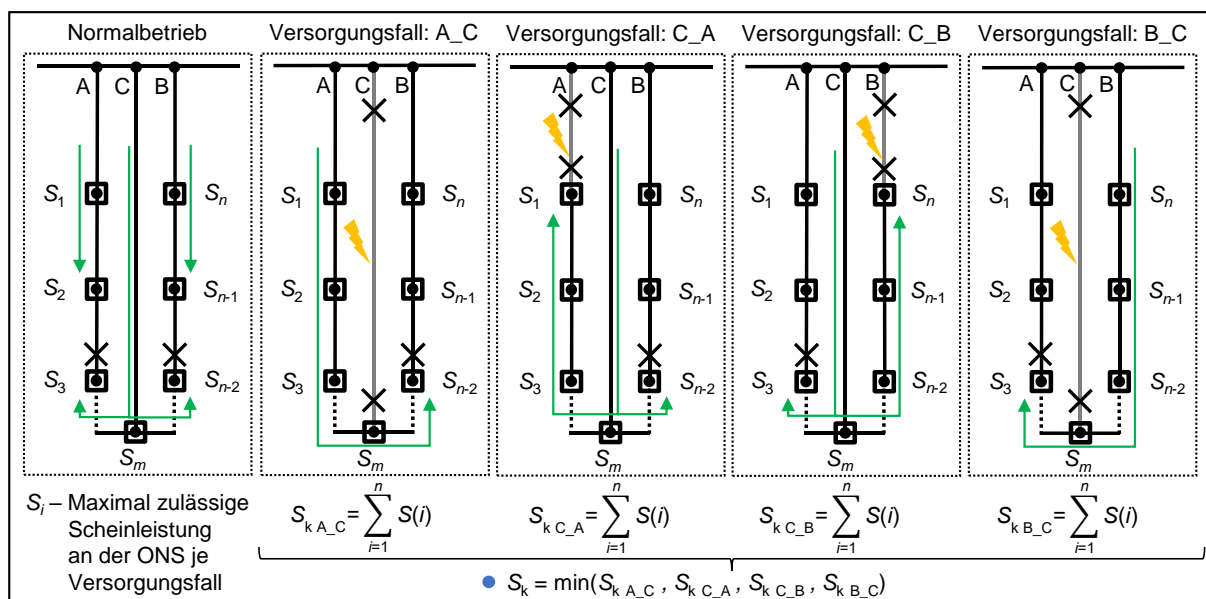


Abbildung 2: Ungünstigste Versorgungsfälle bei konventioneller Entstörung in MS-Ringen mit Mittelsehne

Die vier Versorgungsfälle bei der optimierten Entstörung ergeben sich durch die Lage der Mittelsehne und sind in Abbildung 3 dargestellt. Aus den betrachteten Versorgungsfällen mit den maximal möglichen Scheinleistungen $S_{o_{A,C}}$, $S_{o_{C,A}}$, $S_{o_{C,B}}$ und $S_{o_{B,C}}$ wird der Fall mit der geringsten Aufnahmekapazität ausgewählt und als S_o bezeichnet.

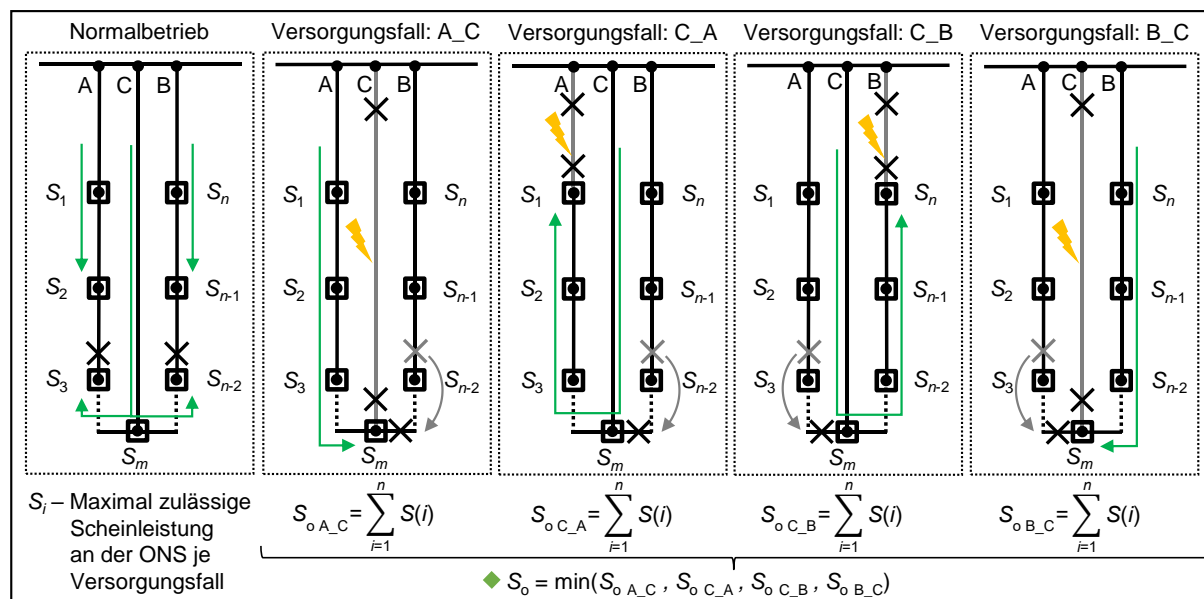


Abbildung 3: Ungünstigste Versorgungsfälle bei trennstellenoptimierter Entstörung in MS-Ringen mit Mittelsehne

3.1 Bestehende MS-Ringe mit Mittelsehne

An den bestehenden 17 MS-Ringen mit Mittelsehne wird das Aufnahmepotential der konventionellen Vorgehensweise mit der optimierten Trennstellenverschiebung im Fehlerfall verglichen. Die Belastbarkeit in Abbildung 4 a) bezieht sich auf die versorgbare Scheinleistung S_k (blau) und S_o (grün) in Bezug auf die im Ring installierte Transformatorleistung $S_{inst.}$. Abbildung 4 b) zeigt die zusätzliche Belastbarkeit bei der Trennstellenoptimierung gegenüber dem konventionellen Verfahren (Differenz).

Die Belastungsgrenze der MS-Netze liegt unabhängig vom Entstörungskonzept teilweise schon bei sehr niedriger Auslastung $S/S_{inst.}$ der Ortsnetztransformatoren. In 7 der 17 untersuchten Netze kann die Last durch das optimierte Konzept erhöht werden. Das Potential zur Erhöhung der Last an den ONS liegt zwischen 3 % und 14 %, was einer zusätzlichen Scheinleistung in den einzelnen Ring zwischen 0,36 MVA und 3,20 MVA entspricht.

An einer typischen ONS mit einem 630 kVA Transformator entspricht eine Erhöhung des Aufnahmepotentials um 10 % einer Leistung von 63 kVA. Dadurch können zum Beispiel 19 zusätzliche (private) Ladepunkte für Elektrofahrzeuge, bei einer Leistung von 11 kW ($\cos(\varphi) = 1$) und einem angenommenen Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,3 [4], integriert werden. Anstatt der Ladepunkte können unter der Annahme einer elektrischen Spitzenlast von 2,9 kW [5] ($\cos(\varphi) = 1$) und einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,9 bei -6 °C [6] auch 24 Wohneinheiten mit Wärmepumpensystemen beheizt werden.

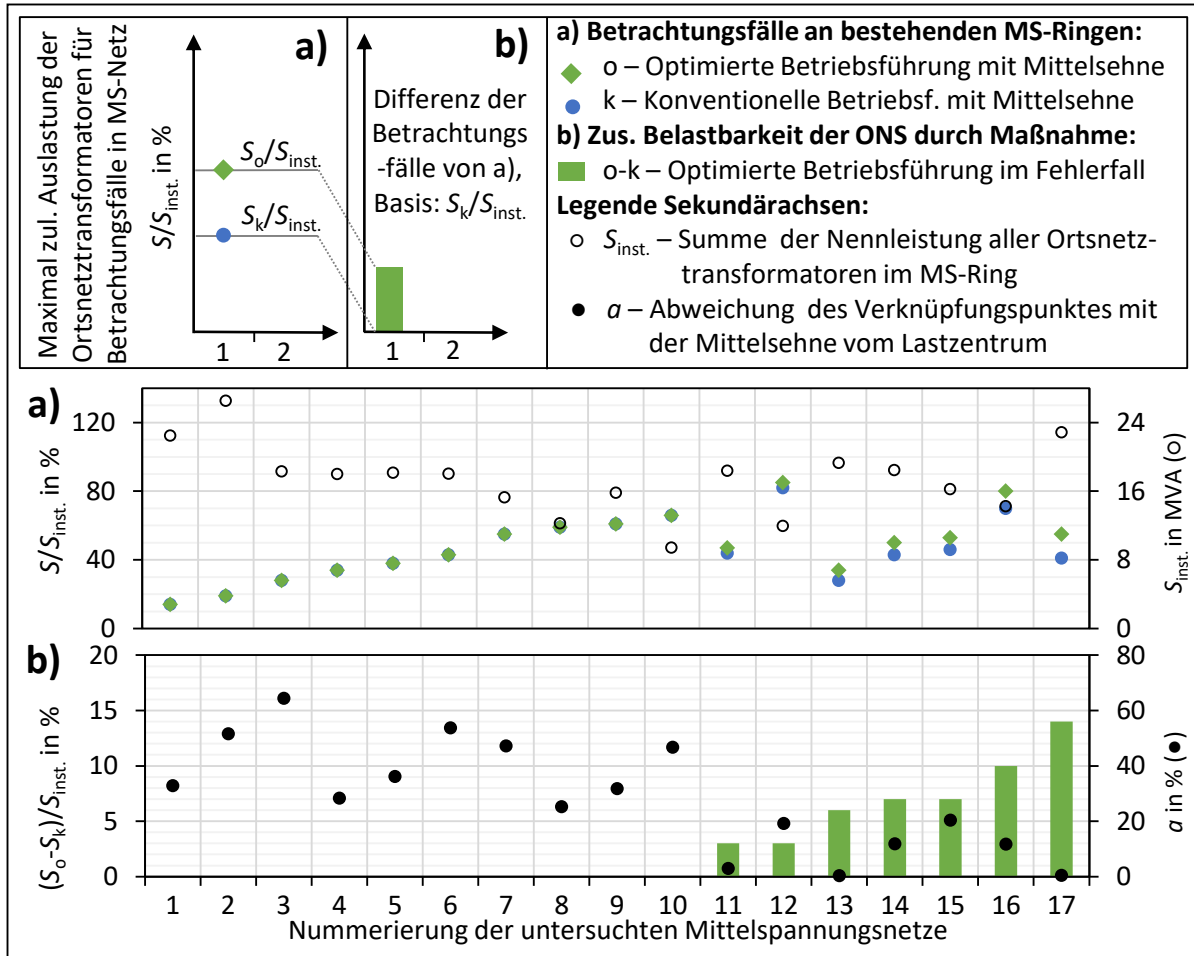


Abbildung 4: Zusätzliche Belastbarkeit bestehender MS-Ring mit Mittelsehne bei der Trennstellenoptimierung

Die installierte Leistung $S_{inst.}$ hat keinen bemerkenswerten Einfluss auf die Wirksamkeit der Trennstellenoptimierung. Bei möglichst zentral liegender Mittelsehne und dadurch einer kleinen Abweichung vom Lastzentrum ist der Mehrwert durch die Optimierung größer. Die abweichende Lage des Verknüpfungspunktes mit der Mittelsehne (ONS mit Index m) vom tatsächlichen Lastzentrum ($S_{inst.}/2$) wird hier mit der Variable a definiert:

$$a = \left| \frac{\frac{S_{inst.}}{2} - \left(\sum_{i=1}^{m-1} S_T(i) + \frac{S_{Tm}}{2} \right)}{\frac{S_{inst.}}{2}} \right| \quad (1)$$

a – Abweichung vom Lastzentrum
 $S_{inst.}$ – Installierte Leistung
 S_T – Transformatorleistung in ONS
 m – Index der zentralen ONS
 i – Laufindex

Bei einer Abweichung $a < 20\%$ kann in den untersuchten Netzen ein Mehrwert durch die Trennstellenoptimierung gegenüber der konventionellen Entstörung erreicht werden. In 10 von 17 Netzen sind die Voraussetzungen für die Trennstellenoptimierung auf Grund der Lage der Mittelsehne sehr ungünstig. Um zu untersuchen, wie groß das Potential bei der bestmöglichen Lage der Mittelsehne tatsächlich ist, werden im nachfolgenden Abschnitt bestehende Ringe im Simulationsmodell um eine Mittelsehne erweitert.

3.2 MS-Ringe mit optimaler Mittelsehne

Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit der Trennstellenoptimierung im Fehlerfall ist eine möglichst gute Lage der Mittelsehne im Lastzentrum. Mit der nachfolgenden Vorgehensweise werden bestehende Ringe um eine Mittelsehne mit optimaler Lage erweitert:

- Aufteilung des Rings (ohne Mittelsehne) in zwei möglichst leistungsgleiche Halbringe
- Anschluss einer zusätzlichen Mittelsehne im Simulationsmodell an der letzten ONS des Halbrings mit der größeren Last
- Parametrierung der Mittelsehne mit dem Standardkabeltyp des Netzes ($I_n = 315 \text{ A}$) und der 1,2-fachen Länge (Trassenfaktor) der Luftlinie zwischen Umspannwerk und ONS
- Festlegung der initialen Trennstellen im Ring mit Mittelsehne, zur Aufteilung der Last im Normalbetrieb auf drei möglichst leistungsgleiche Lastsegmente im Normalbetrieb

Die Vorgehensweise bei der Entstörung erfolgt analog zu den bereits bestehenden Ringen mit Mittelsehne (Abbildung 2 und Abbildung 3). Zusätzlich wird das Aufnahmepotential des bestehenden Rings ohne Mittelsehne untersucht.

Abbildung 5 zeigt die beiden ungünstigsten Versorgungsfälle A_B und B_A beim Ring ohne Mittelsehne, wovon derjenige mit der geringeren Belastbarkeit S_r für den Vergleich herangezogen wird.

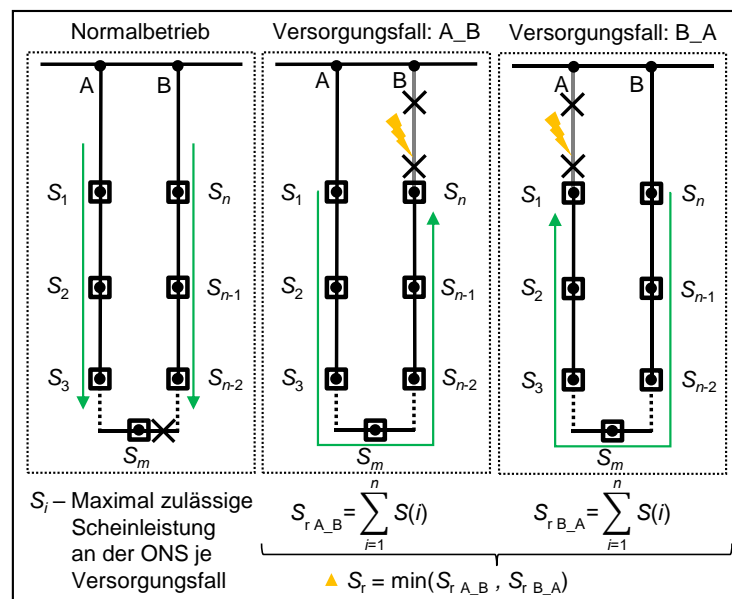


Abbildung 5: Ungünstige Versorgungsfälle bei Kabelfehlern in MS-Ringen ohne Mittelsehne

Aus 36 vorliegenden MS-Ringen werden 29 Netze mit einer installierten Leistung $S_{\text{inst.}} > 8 \text{ MVA}$ für die Untersuchung ausgewählt. Die anderen 7 Netze werden auf Grund der bereits sehr hohen Aufnahmekapazitäten nicht weiter betrachtet. Abbildung 6 a) zeigt die Belastbarkeit der bestehenden Ringe ohne Mittelsehne (gelb), der Ringe mit Erweiterung um eine Mittelsehne und konventioneller Entstörung (blau), sowie der Ringe mit zusätzlicher Mittelsehne und Trennstellenoptimierung (grün). Abbildung 6 b) zeigt die zusätzliche Belastbarkeit durch den Netzausbau mit Mittelsehne und konventioneller Entstörung mit einem blauen Balken. Der zusätzliche Beitrag, der durch die Trennstellenoptimierung erreicht werden kann, ist mit einem grünen Balken dargestellt.

Durch die Erweiterung mit Mittelsehne kann bei der konventionellen Betriebsweise die Last an den ONS zwischen 12 % und 39 % erhöht werden. Bei Optimierung der Betriebsweise kann in 24 der 29 untersuchten Netzen die Last zusätzlich zwischen 5 % und 30 % (bzw. 0,97 MVA und 3,14 MVA im Ring) erhöht werden und dadurch das Aufnahmepotential gegenüber der konventionellen Methode häufig fast verdoppelt werden.

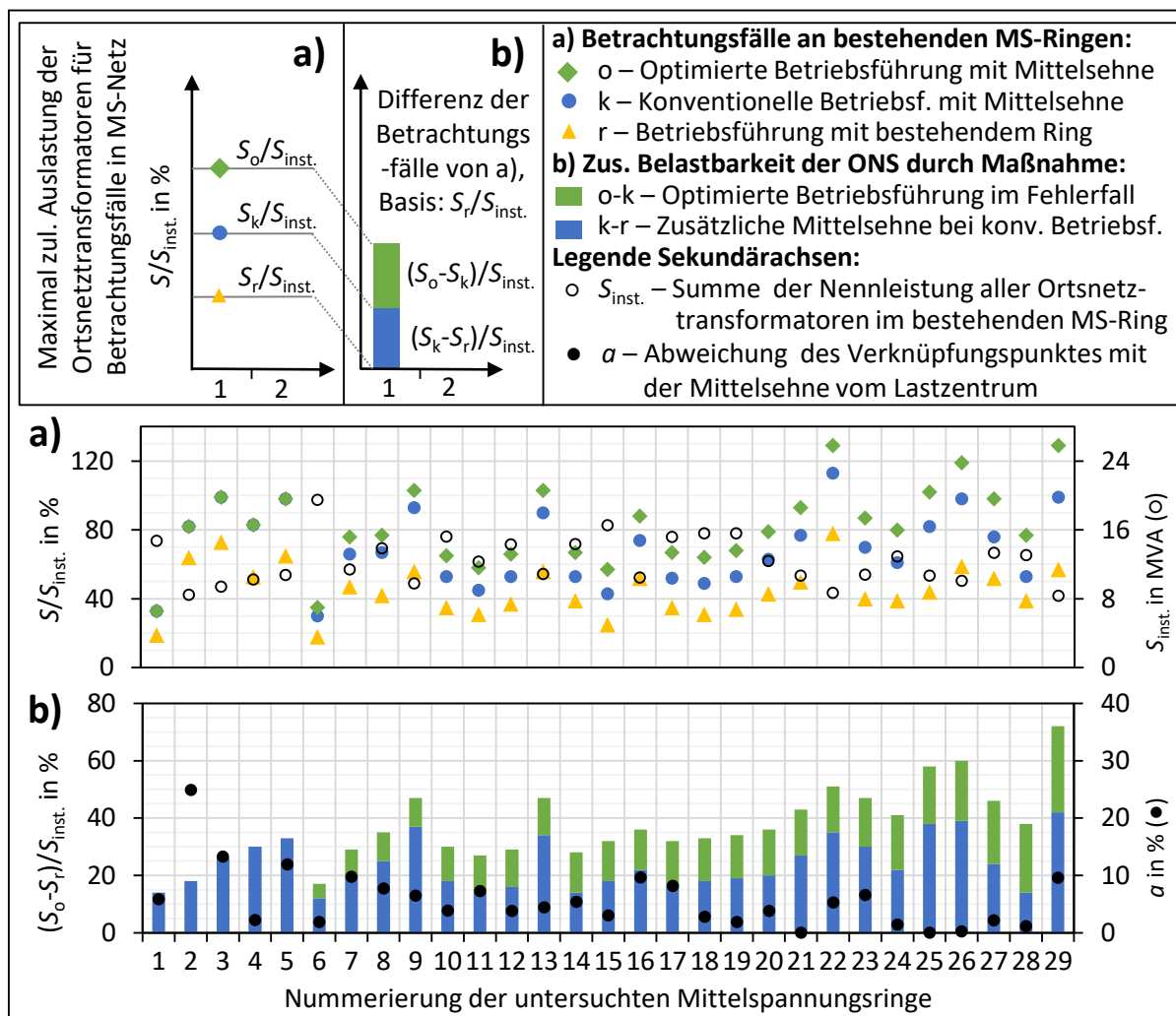


Abbildung 6: Zusätzliche Belastbarkeit von MS-Ring mit erweiterter Mittelsehne bei der Trennstellenoptimierung

Trotz der optimalen Lage der Mittelsehne kann in fünf Netzen (Nummer = 1, 2, 3, 4, 5) kein Mehrwert durch die Trennstellenoptimierung erreicht werden. Ursache dafür ist die Kombination aus einer geringen Anzahl an ONS (Anzahl = 14, 7, 10, 8, 10) im Ring und einzelner ONS mit hoher Leistung S_{ONS} , in Bezug auf die installierten Leistung $S_{inst.}$ ($S_{ONS}/S_{inst.} = 22\%, 30\%, 33\%, 25\%, 21\%$), was die Lastverlagerung bei der Trennstellenverschiebung erschwert. Hinzu kommen noch Leitungen mit inhomogener Strombelastbarkeit auf Grund unterschiedlicher Kabeltypen.

3.3 MS-Ringe mit optimaler Mittelsehne und homogener Strombelastbarkeit

Der Nennstrom der Mittelspannungskabel im untersuchten Netzgebiet liegt typischerweise bei 312 A bzw. 315 A. Ältere Kabeltypen begrenzen die Strombelastbarkeit einzelner Netze auf einen Nennstrom von bis zu 240 A. Um den Einfluss der begrenzenden Kabeltypen auf die Wirksamkeit der Trennstellenoptimierung bewerten zu können, wird in Abbildung 7 verglichen, wie sich das zusätzliche Aufnahmepotential verändert, wenn alle Kabeltypen mit einem Nennstrom kleiner 312 A durch den aktuellen Standardkabeltyp mit 315 A ersetzt werden. Die Balken mit der Zuordnung I) stammen aus Abbildung 6 b).

Die Balken mit der Zuordnung II) setzen sich aus der zusätzlichen Belastbarkeit durch die Verstärkung des bestehenden Rings (gelb), der Mittelsehne bei konventioneller Betriebsführung (blau) und der zusätzlichen Belastbarkeit durch Trennstellenoptimierung im Fehlerfall (grün) zusammen.

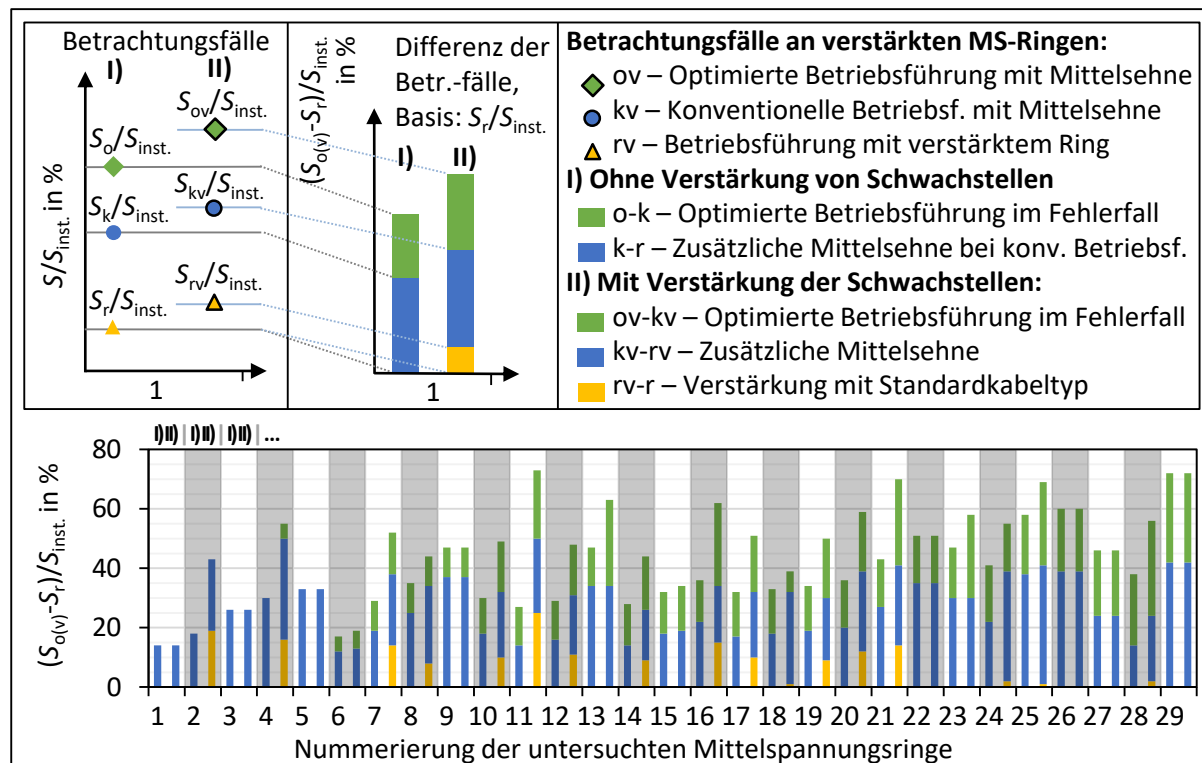


Abbildung 7: Einfluss von strombegrenzenden Kabeltypen in MS-Ring auf die Trennstellenoptimierung

In 17 der 29 Netze kann das Aufnahmepotential der Ringe ohne Mittelsehne durch das Austauschen der strombegrenzenden Kabeltypen deutlich erhöht werden. Daraus resultiert auch eine zusätzliche Belastbarkeit bei der Trennstellenoptimierung, die häufig nochmals gesteigert werden kann.

3.4 Verallgemeinerung

Voraussetzung für den Mehrwert der Trennstellenoptimierung ist eine möglichst zentrale Lage der Mittelsehne (Lastzentrum), eine möglichst große Anzahl kleiner ONS im Ring und eine möglichst homogene Strombelastbarkeit der Leitungen. Tabelle 2 zeigt die zusätzliche Belastbarkeit aller untersuchten 46 MS-Ringe mit Mittelsehne bei der Trennstellenoptimierung im Fehlerfall gegenüber dem konventionellen Konzept. Die Tabellenwerte beziehen sich auf die Mittelwerte der Netze mit homogenisierten Kabelnennströmen. Die horizontale Achse bezieht sich auf die abweichende Lage a der Mittelsehne vom Lastzentrum und die vertikale Achse auf das Verhältnis der größten ONS im Ring zur installierten Leistung im Ring $S_{ONS}/S_{inst.}$.

Tabelle 2: Zusätzliche Belastbarkeit von MS-Ringen mit homogenisierten Kabelnennströmen bei der Trennstellenoptimierung in Abhängigkeit der Lage der Mittelsehne und der größten ONS im Ring

X % (Y)		Abweichende Lage der Mittelsehne vom Lastzentrum a in %				
		a < 5	5 ≤ a < 10	10 ≤ a < 15	15 ≤ a < 20	a ≥ 20
Verhältnis der größten ONS zur installierten Leistung im Ring	$S_{ONS}/S_{inst.} < 10$	18 % (9)	15 % (2)	9 % (2)	# (0)	0 % (3)
	$10 \leq S_{ONS}/S_{inst.} < 15$	18 % (4)	19 % (3)	# (0)	# (0)	2 % (3)
	$15 \leq S_{ONS}/S_{inst.} < 20$	21 % (3)	25 % (4)	# (0)	3 (1)	0 % (2)
	$20 \leq S_{ONS}/S_{inst.} < 25$	4 % (2)	0 % (1)	0 % (1)	# (0)	0 % (1)
$S_{ONS}/S_{inst.}$ in %	$S_{ONS}/S_{inst.} \geq 25$	# (0)	10 % (1)	0 % (1)	# (0)	0 % (3)
X % (Y) - Mittelwert X aus der Anzahl an Y Netzen für die zusätzlich mögliche Auslastung der ONS bei der Trennstellenoptimierung gegenüber dem konventionellen Entstörungskonzept						

Die Verallgemeinerung zeigt, dass in allen untersuchten Netzen, bei einem $a < 20$ % und $S_{ONS}/S_{inst.} < 20$ % (grüne Zahlen), durch die Trennstellenoptimierung eine Erhöhung der Auslastung möglich ist. Abhängig von a und dem Verhältnis $S_{ONS}/S_{inst.}$ kann die Auslastung um bis zu 25 % erhöht werden. Je zentraler die Mittelsehne im Ring liegt und je kleiner die Lasten der einzelnen ONS im Ring sind, desto besser funktioniert die Umsetzung des Konzeptes.

Abweichungen davon gibt es in den Zellen für $a < 10$ % und $10 \% \leq S_{ONS}/S_{inst.} < 20$ %. Bei genauerer Betrachtung der Netze in diesem Wertebereich fällt auf, dass im Normalbetrieb die Aufteilung der Last auf drei annähernd gleich große Ring-Segmente, auf Grund einzelner großer ONS, nicht funktioniert. Das wirkt sich besonders negativ auf die versorgbare Last beim konventionellen Entstörungskonzept aus. Beim optimierten Konzept können, je nach Netz, die Trennstellen nach der Verschiebung besser liegen und durch die abweichende Lage der Mittelsehne die Situation begünstigen. Festzustellen ist dieses Verhalten auch in Zelle $S_{ONS}/S_{inst.} > 25$ % mit $5 \% \leq a < 10$ %. Nachdem das primäre Ziel eine möglichst leistungsgleiche Aufteilung der Last auf die drei speisenden MS-Abgänge im Normalbetrieb ist, wird der Einfluss nicht weiter betrachtet.

4 Steigende Komplexität bei der Umsetzung des Konzeptes

Die Erhöhung des Aufnahmepotentials bei der Trennstellenoptimierung basiert auf zusätzlichen Schalthandlungen in den ONS. Innerhalb des untersuchten Mittelspannungsnetzes und in den Netzebenen darunter müssen Schalthandlungen typischerweise manuell durchgeführt werden. Bei einem MS-Kabelfehler werden mit dem konventionellen Entstörungskonzept zwei manuelle Schalthandlungen durchgeführt, um das betroffene Kabel freizuschalten und eine manuelle Schalthandlung um die initiale Trennstelle zum benachbarten Abgang zu schließen.

Beim optimierten Entstörungskonzept müssen je nach Fehlerort noch zwei zusätzliche Schalthandlungen durchgeführt werden, um die zweite initiale Trennstelle zur Mittelsehne zu verschieben. Bereits bei der Automatisierung und Fernsteuerung von drei ONS kann der Schaltungsaufwand auf maximal zwei manuellen Schalthandlungen und damit weniger als beim konventionellen Konzept reduziert werden. Das reduziert zugleich die Zeit bis zur Wiederversorgung der Kunden. Die Automatisierung der Schaltanlagen muss dafür an den ONS mit den initialen Trennstellen und der zentralen ONS, wo die Mittelsehne endet, erfolgen.

Zur Reduzierung der Unterbrechungszeiten bei Kabelfehlern in MS-Ringen, wird im untersuchten Netz wie auch bei anderen Verteilnetzbetreibern die 3-Punkt-Automatisierung umgesetzt [7]. Das Prinzip beinhaltet die Fernsteuerung der Schaltanlagen und die Fernauslesung der Kurzschlussanzeiger von drei strategisch ausgewählten ONS im Ring. Die drei Stationen befinden sich bei Ringen ohne Mittelsehne an der initialen Trennstelle im Lastzentrum und jeweils bei der Hälfte der Anzahl an ONS im Halbring. Mit dieser Auswahl kann der Fehlerort durch die Netzleitstelle weiter eingegrenzt und der zeitaufwändige, manuelle Such- und Schaltungsaufwand reduziert werden. [7] Die bei der 3-Punkt-Automatisierung ferngesteuerten ONS in Ringen ohne Mittelsehne können bei der Erweiterung dieser Ringe um eine Mittelsehne für die Trennstellenoptimierung im Fehlerfall ebenfalls verwendet werden. Bei beiden Anwendungen erfolgt die Automatisierung einer ONS im Lastzentrum. Die Strategie bei der Automatisierung der beiden anderen ONS unterscheidet sich. Während die Auswahl des Ortes bei der 3-Punkt-Automatisierung von der Anzahl der ONS bzw. Kabelverbindungen im Halbring entscheidend ist, sind bei der Trennstellenoptimierung die initialen Trennstellen (Lastverteilung auf ONS) im Ring mit Mittelsehne relevant. Bei einem MS-Ring mit Mittelsehne und gleich großen ONS würden die automatisierten Stationen für die Trennstellenoptimierung im Idealfall bei 33 %, 50 % und 67 % der Last bzw. der Anzahl der Stationen im Ring liegen - bei der 3-Punkt-Automatisierung hingegen bei 25 %, 50 % und 75 %. Für das Aufnahmepotential bei der Trennstellenoptimierung ist die abweichende Lage der automatisierten Stationen und damit der initialen Trennstellen nicht relevant. Im Normalbetrieb würde sich die Last jedoch sehr ungleich mit 25 %, 50 % und 25 % auf die drei Ringsegmente aufteilen, was die Verluste im Netz erhöhen kann. Bei wenigen Stationen im Ring oder bei ungleichmäßiger Aufteilung der Last zwischen den ONS können sich die gleichen Orte für die bestmögliche Lage zur Automatisierung ergeben. Das trifft bei 4 der 29 realen Netze von Abbildung 6 zu.

Die Strombelastung an den MS-Abgangsfeldern bzw. der Kabelanfangsstrecken wird im untersuchten Netz durch eine Messung im Umspannwerk dauerhaft überwacht und darf im Normalbetrieb eine Auslastung von 65 % des Kabelnennstroms nicht überschreiten. Diese Information war im betrachteten, lastdominierenden Verteilnetz bisher ausreichend, um auch für den ungünstigsten Fehlerfall die maximal zur erwartende Belastung, aus der Summe der Lastprofile von zwei MS-Abgangsfeldern, abzuschätzen. Beim Betriebskonzept mit Trennstellenoptimierung sind die Messaufzeichnungen an den MS-Abgangsfeldern nicht mehr ausreichend. Um die maximal auftretende Belastung der MS-Kabel für die ungünstigsten Fehler nach Abbildung 3 abzuschätzen zu können, werden zusätzliche Informationen zur Lastaufteilung benötigt. Die aktuelle Lastaufteilung kann durch zusätzliches Messequipment im Normalbetrieb ermittelt und anschließend für die ungünstigsten Versorgungsfälle berechnet werden. Die Messung der Lastaufteilung kann auf der NS-Seite aller Ortsnetztransformatoren im Ring erfolgen.

Sollte in Zukunft jede Kundenanlage einen Smart-Meter besitzen, ist kein zusätzliches Messequipment notwendig, da der Summenlastgang der intelligenten Zähler für die ONS ermittelt werden kann. Alternativ kann an der zentralen ONS, in die die Mittelsehne mündet, eine MS-(Strom)-Messung an den drei MS-Kabelsystemen und dem MS-Feld zum Transformator MS/NS erfolgen.

Bei der Erweiterung eines MS-Rings um eine Mittelsehne ist diese an die ONS im Lastzentrum anzuschließen, um das Aufnahmepotential bei der Trennstellenoptimierung zu maximieren. Bei der konventionellen Betriebsführung macht es keinen relevanten Unterschied, ob die Mittelsehne tatsächlich im Lastzentrum angeschlossen wird, solange damit das mittlere Ringsegment erreicht wird. Da die Verlegung von Kabelstrecken, vor allem im städtischen Bereich, mit aufwändigen Baumaßnahmen verbunden ist, kann bei der konventionellen Variante, auf Grund mehrerer Optionen für den Anschluss der Mittelsehne, die Kabeltrasse verkürzt werden. Für die Untersuchung in dieser Arbeit wird angenommen, dass die Last an den ONS im MS-Ring proportional zur installierten Transformatorleistung steigt. Somit würde die Mittelsehne unabhängig von der Höhe des Lastanstiegs immer im Lastzentrum bleiben. Bei einem ungleichmäßigen Anstieg würde die Lage der Mittelsehne aus dem Lastzentrum wandern und dadurch das Aufnahmepotential bei der Trennstellenoptimierung reduzieren.

Die Lage der initialen Trennstellen bei den bereits bestehen Ringen mit Mittelsehne wurden im Simulationsmodell auf die optimale Lage bezüglich der angenommen Last verschoben. Die tatsächliche Lage der initialen Trennstellen in den realen Netzen liegt häufig am gleichen Ort oder den benachbarten ONS. Die abweichende Lage der Trennstellen zwischen Simulationsmodell und realen Netzen kann aus abweichenden Annahmen zur Lastaufteilung oder anderen betrieblichen Hintergründen resultieren. Bei der angenommenen Lastverteilung auf die ONS ist eine Abweichung des mittleren Lastgangs von etwa $\pm 10\%$, bezogen auf die Transformatorleistung, zu erwarten [8]. Betriebliche Hintergründe durch abweichende Trennstellen können zum Beispiel die Versorgungssicherheit oder besondere Anforderungen bei der Wiederversorgung kritischer Verbraucher sein.

Die thermische Auslastung der MS-Kabel im Normalbetrieb mit bis zu 87 % bei der optimierten Betriebsweise, anstatt bisher 65 %, führt zu einer stärkeren Vorwärmung der Kabel. Die zulässige Dauer der erhöhten Belastung mit bis zu 130 % im (n-1)-Fall reduziert sich dadurch. Die Belastung mit bis zu 130 % des Nennstroms hat sich in der Vergangenheit als Optimum zwischen dem Ausfallrisiko und der Wirtschaftlichkeit bewährt. Nur in einem sehr ungünstigen und unwahrscheinlichen Fall wird die Belastung mit 130 % des Kabelnennstroms tatsächlich erreicht, wofür die nachfolgenden Bedingungen erfüllt sein müssen:

- Der Fehler muss am ungünstigsten Ort im Ring auftreten
- Das Netz muss bis zu seiner Belastungsgrenze ausgelastet sein
- Der Zeitpunkt des Fehlers fällt auf die Jahreszeit mit der Höchstlast

Bei der Trennstellenoptimierung werden theoretisch zwei Abgänge des betroffenen Netzes mit bis zu 130 % des Kabelnennstroms belastet. In der Praxis wird sich die Last auf Grund der abweichenden Lage der Mittelsehne vom Lastzentrum nur selten gleich aufteilen lassen, was dazu führt, dass bei maximaler Auslastung des Netzes, eines der beiden Kabelsysteme 130 % des Nennstroms nicht erreichen wird. Bei der parallelen Verlegung dieser Kabelsysteme ist zu berücksichtigen, dass sich die zulässige Dauer der thermischen Belastung reduzieren kann. Die Beeinträchtigung hängt von der Verlegeart mit Erdbodenbeschaffenheit, dem Abstand der Kabelsysteme sowie der Länge der parallel verlegten Strecke ab.

5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Trennstellenoptimierung im Fehlerfall erfolgt bei einer Maßnahme an bestehenden MS-Ringen mit und ohne Mittelsehne, sowie bei der Planung neuer Netzgebiete. Tabelle 3 zeigt die angesetzten Investitions- und Betriebskosten für die Berechnungen.

Tabelle 3: Investitions- und Betriebskosten in MS-Netzen und für Messequipment auf Basis von [9]

Betriebsmittel	Lebensdauer	Investitionskosten	Betriebskosten
MS-Kabel: Material (15.000 €/km), Erdarbeiten, Erdschlusskompensation, Grundstück	40 a	105.000 €/km	1.050 €/km·a
MS-Feld im UW: Sammelschiene (anteilig), Leitungsfeld, Sekundärtechnik, Grundstück	30 a	70.000 €	1.400 €/a
Intelligentes Messsystem: Messeinrichtung, Gateway und Sicherheitsmodul	13 a	470 €	117 €/a
Zusätzliche moderne Messeinrichtung	13 a	111 €	5 €/a
Kabelumbauwandler für MS-(Strom)-Messung an einem Drehstromsystem	30 a	570 €	5 €/a

Das Intelligente Messsystem besteht aus der Messeinrichtung, Gateway und Sicherheitsmodul. Die Investitions- und Betriebskosten von 470 € und 117 €/a setzen sich aus der Datenerfassung, -übertragung und -verarbeitung in einem IT-System zusammen. Weil die Kosten für die Datenübertragung stark von den lokalen Gegebenheiten und der Aufwand für die Datenverarbeitung von der Anwendung abhängt, werden die Kosten in [9] als Mittelwert unterschiedlicher Technologien ermittelt.

Die Wirtschaftlichkeit der Trennstellenoptimierung wird anhand der jährlichen Investitions- und Betriebskosten bewertet. Die Berechnung der jährlichen Annuität AN in Gleichung (2) erfolgt durch lineare Abschreibung aus den Investitionskosten K_0 , Lebensdauer n und dem Zinssatz i von 4 %.

$$AN = K_0 \cdot \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad \begin{array}{l} AN - \text{Annuität} \\ K_0 - \text{Kapitalwert} \\ i - \text{Zinssatz} \\ n - \text{Lebensdauer} \end{array} \quad (2)$$

Für die Umsetzung der Trennstellenverschiebung wird angenommen, dass die Automatisierung der Schaltanlagen bereits im Rahmen der 3-Punkt-Automatisierung an den idealen Orten für die Optimierung durchgeführt wurde. Beim Messequipment wird zwischen zwei Varianten unterschieden. Einer NS-Messung in allen ONS und vier MS-(Strom)-Messungen in der zentralen ONS. Für die NS-Messung mit intelligentem Messsystem sind bereits Stromwandler auf NS-Seite des Ortsnetztransformators vorhanden. Die MS-(Strom)-Messung findet an den drei MS-Kabelfeldern und am MS-Abgangsfeld für den Transformator in der zentralen ONS mit einem intelligentem Messsystem und drei zusätzlichen, modernen Messeinrichtungen statt. Tabelle 4 zeigt die Berechnung der jährlichen Kosten für die MS-(Strom)-Messung und die NS-Messung für eine Anzahl von 10 und 23 ONS im MS-Ring.

Tabelle 4: Kosten für unterschiedliche Varianten bei der Messung der Lastaufteilung an MS-Ring mit Mittelsehne

	MS-(Strom)-Messung in zentraler ONS	NS-Messung in Ring mit 10 ONS	NS-Messung in Ring mit 23 ONS
Intelligentes Messsystem	1 System	10 Systeme	23 Systeme
Zusätzliche moderne Messeinrichtung	3 Systeme	0	0
Kabelumbauwandler für MS-(Strom)-Messung	4 Systeme	0	0
Jährliche Kosten	364 €/a	1.641 €/a	3.773 €/a

Die MS-(Strom)-Messung in der zentralen ONS kostet unabhängig von der Anzahl der ONS im Ring 364 €/a und ist deutlich günstiger als die NS-Messung. Für die NS-Messung entstehen pro ONS Kosten von 164 €/a, was bei kleinen MS-Ringen mit 10 ONS bzw. großen mit 23 ONS 1.641 €/a und 3.773 €/a entspricht.

5.1 Bestehende MS-Ringe mit Mittelsehne

Die Wirtschaftlichkeit der Trennstellenoptimierung wird zunächst an bestehenden MS-Ringen mit dem konventionellen Netzausbau verglichen. Der konventionelle Netzausbau erfolgt durch die Aufteilung des bestehenden Rings mit Mittelsehne in zwei eigenständige Ringe ohne Mittelsehne. Für die Aufteilung wird ein zusätzliches MS-Abgangsfeld im Umspannwerk und eine Leitung (Annahme: Länge 1 km) benötigt, die den zweiten Ring schließt. Das Aufnahmepotential der beiden Maßnahmen ist etwa gleich groß bzw. bei der konventionellen Maßnahme etwas größer. Die Aufteilung des Netzes in Abbildung 1 in zwei Ringe kann durch die Verlegung der Leitung zwischen ONS 8 und 7 von ONS 8 zur MS-Sammelschiene im Umspannwerk erfolgen. Das Aufnahmepotential des resultierenden ersten Rings von ONS 1 bis 7 ist somit gleich groß wie bei der Trennstellenoptimierung. Das Aufnahmepotential des zweiten Rings von ONS 8 bis 13 ist bei der konventionellen Maßnahme etwas größer, da in einem ungünstigen Versorgungsfall ONS 7 nicht mitversorgt werden muss. Bei den realen Netzen wie zum Beispiel in Abbildung 6 Nummer 10 unterscheidet sich das Aufnahmepotential an den ONS um 6 % der Auslastung.

Tabelle 5: Vergleich der Trennstellenoptimierung im Fehlerfall mit dem konventionellen Netzausbau als Integrationsmaßnahme an bestehenden MS-Ringen mit Mittelsehne

	Trennstellenoptimierung im Fehlerfall		Konventionell
	MS-(Strom)-Messung in zentraler ONS	NS-Messung in Ring mit 23 ONS	Aufteilung in zwei Ringe
Kosten Messung	364 €/a	3.773 €/a	0
Leitung mit Trasse (1 km)	0	0	6.355 €/a
MS-Abgangsfelder	0	0	5.448 €/a
Zusätzliche jährliche Kosten	364 €/a	3.773 €/a	11.803 €/a

Bei bestehenden MS-Ringen mit Mittelsehne kann das Konzept mit Hilfe einer der beiden vorgestellten Messvarianten direkt umgesetzt werden. Auch wenn die zusätzliche Leitung beim konventionellen Netzausbau deutlich kürzer als 1 km ist, sind die Kosten für das zusätzliche MS-Abgangsfeld größer als für das zusätzliche Equipment beider Messvarianten bei der Trennstellenoptimierung.

5.2 Bestehende MS-Ring ohne Mittelsehne

Bestehende MS-Ringe ohne Mittelsehne werden um eine Mittelsehne mit Trennstellenoptimierung im Fehlerfall erweitert. Vergleichsgrundlage ist wieder die Aufteilung in zwei unabhängige Netzringe ohne Mittelsehne. Für die konventionelle Alternative werden wie in Tabelle 5 ein zusätzliches MS-Abgangsfeld im Umspannwerk und eine zusätzliche Leitung benötigt. Bei der zusätzlichen Leitung wird berücksichtigt, dass diese zum gleichen Zeitpunkt in derselben Trasse wie die erste Leitung verlegt wird und damit nur die zusätzlichen Kosten für das Material des Kabels anfallen. In Tabelle 6 werden die Kosten für die Integrationsmaßnahmen verglichen.

Tabelle 6: Vergleich der Trennstellenoptimierung im Fehlerfall mit dem konventionellen Netzausbau als Integrationsmaßnahme an bestehenden MS-Ringen ohne Mittelsehne

	Trennstellenoptimierung im Fehlerfall		Konventionell
	MS-(Strom)-Messung in zentraler ONS	NS-Messung in Ring mit 23 ONS	Aufteilung in zwei Ringe
Kosten Messung	364 €/a	3.773 €/a	0
Leitung mit Trasse (1 km)	6.355 €/a	6.355 €/a	6.355 €/a
Leitung in Trasse (1 km)	0	0	908 €/a
MS-Abgangsfelder	5.448 €/a	5.448 €/a	10.896 €/a
Zusätzliche jährliche Kosten	12.167 €/a	15.576 €/a	18.159 €/a

Bei der konventionellen Maßnahme kann durch die Aufteilung des bestehenden Rings in zwei einzelne Ringe die Aufnahmekapazität in etwa verdoppelt werden. Vor allem die beiden zusätzlichen Abgangsfelder im Umspannwerk mit jährlich 10.896 € wirken sich stark auf die Kosten der konventionellen Maßnahme aus. Bei der zusätzlichen Mittelsehne mit Trennstellenoptimierung können 5.692 €/a bzw. 2.583 €/a eingespart werden.

Zur Erhöhung des Aufnahmepotentials an bestehenden MS-Ringen ist die Trennstellenoptimierung die kostengünstigere Maßnahme gegenüber dem konventionellen Netzausbau, sofern das entstehende Integrationspotential ausreichend groß ist. Für die Grundsatzplanung neuer Netze wird nachfolgend untersucht, ob der Ring mit Mittelsehne und Trennstellenoptimierung wirtschaftlicher als der klassische Ring ohne Mittelsehne ist.

5.3 Grundsatzplanung für neue MS-Netze

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Ringtopologien bei der Konzeptionierung wird das Mittelspannungsnetz eines neuen Umspannungsgebiets HS/MS geplant. Dabei werden die drei nachfolgenden Planungsvarianten verglichen:

- Ringtopologie ohne Mittelsehne
- Ringtopologie mit Mittelsehne und konventioneller Entstörung
- Ringtopologie mit Mittelsehne und trennstellenoptimierter Entstörung

Es wird angenommen, dass sich im betrachteten Umspannungsgebiet 150 ONS befinden, die gleichzeitig mit einer Last von 600 kVA zu versorgen sind. Der Standardkabeltyp hat einen Nennstrom von 315 A und darf im (n-1)-Fall mit bis zu 130 % (410 A) belastet werden.

Bei symmetrischer Belastung, Vernachlässigung des Spannungsfalls und einer Netzspannung von 10,1 kV kann im (n-1)-Fall pro Abgangskabel eine Last von 7,2 MVA ($S = \sqrt{3} \cdot 10,1 \text{ kV} \cdot 410 \text{ A}$) versorgt werden. Es wird angenommen, dass pro ONS 400 m MS-Kabel benötigt werden, um sie in den Ring einzubinden. Außerdem werden zusätzlich 400 m Leitung pro Abgangsfeld im Umspannwerk und 600 m Aufschlag für jede Mittelsehne eingeplant. In Tabelle 7 werden für die unterschiedlichen Planungsvarianten, die relevanten Kosten für MS-Kabel und MS-Abgangsfelder im Umspannwerk (UW) miteinander verglichen.

Tabelle 7: Jährliche Kosten für Kabel und Schaltanlagen von MS-Ringen mit unterschiedlichen Planungsvarianten

	Ring ohne Mittelsehne	Ring mit Mittelsehne und konv. Entstörung	Ring mit Mittelsehne und trennstellenoptimierter Entstörung	
Max. Anzahl ONS pro Netz	12	18	23	
Anzahl MS-Netze	13	9	7	
Anzahl MS-Felder im UW	26	27	21	
Länge MS-Kabel	70,4 km	76,2 km	72,6 km	
Kosten ohne Messung	589 T€/a	631 T€/a	576 T€/a	
Zusätzliches Messequipment	nicht notwendig	nicht notwendig	MS-Messung	NS-Messung
Kosten für Messung	0	0	3 T€/a	26 T€/a
Kosten mit Messung	589 T€/a	631 T€/a	579 T€/a	602 T€/a
Vergleich	Basis	+7 %	-2 %	+2 %

Die Realisierung von Ringen mit Mittelsehne bei konventioneller Entstörung ist die teuerste Variante und 7 % teurer als der klassische Ring mit 589 T€/a. Die Kosten für MS-Kabel und MS-Abgangsfelder sind bei der Trennstellenoptimierung auf Grund der Einsparung von sechs Feldern günstiger. Bei der Trennstellenoptimierung sind zusätzliche Kosten für Messequipment zu berücksichtigen. Die Gesamtkosten für die MS-Netze bei der Trennstellenoptimierung liegen abhängig vom Messverfahren um 2 % über (NS-Messung) und 2 % unter (MS-(Strom)-Messung) dem klassischen Ringkonzept ohne Mittelsehne.

Auch wenn die trennstellenoptimierte Variante mit MS-(Strom)-Messung geringere Gesamtkosten verursacht, ist die eingeschränkte Flexibilität bei der Netzplanung zu berücksichtigen. Häufig weichen die Größe und damit der Leistungsbezug der einzelnen ONS im Ring, anders als in dieser Untersuchung idealisiert angenommen, stark voneinander ab. Außerdem wird der Anstieg der Last nicht immer proportional zur installierten Leistung erfolgen. Das erschwert die Trennstellenverschiebung und verringert das Aufnahmepotential. Ein reduziertes Aufnahmepotential muss durch zusätzliche Netzringe und die daraus resultierenden zusätzlichen Kosten kompensiert werden. Die Gesamtkosten bei einem zusätzlichen MS-Ring (8 anstatt bisher 7 MS-Ringe mit Mittelsehne) sind gegenüber dem Basisfall um 3 % höher.

Für die Grundsatzplanung neuer Mittelspannungsnetze ist der klassische MS-Ring ohne Mittelsehne auf Grund der höheren Flexibilität vorzuziehen. Bei der Integration zusätzlicher Lasten an bestehenden MS-Netzen ist bei ausreichendem Aufnahmepotential die Trennstellenoptimierung die wirtschaftlichere Lösung.

6 Erkenntnisse und Ausblick

Städtische Mittelspannungsnetze sind typischerweise als Ringtopologie ausgeführt und werden bei ansteigender Last mit einer Mittelsehne verstärkt. Im untersuchten Netzgebiet speisen etwa 40 % der Umspannwerks-Abgangsfelder einen Ring mit Mittelsehne. Bei idealen Voraussetzungen kann die Strombelastbarkeit der Abgangsfelder im Normalbetrieb durch die Optimierung der Betriebsweise von 65 % auf 87 % erhöht und aufwändiger Netzausbau vermieden werden.

Gute Voraussetzungen für die Trennstellenoptimierung im Fehlerfall liegen vor, wenn die Mittelsehne des Rings möglichst im Lastzentrum angeschlossen ist. Eine große Anzahl an Ortsnetzstationen im Ring mit möglichst gleichmäßiger Lastaufteilung begünstigen die Möglichkeiten bei der Trennstellenverschiebung und damit das zusätzliche Aufnahmepotential.

Die Untersuchung an 17 bestehenden MS-Ringen mit Mittelsehne zeigen, dass in 7 der 17 Netze die Auslastung an den Ortsnetzstationen durch die Trennstellenoptimierung zwischen 3 % und 14 % erhöht werden kann. In 10 Netzen ist die Lage der Mittelsehne so ungünstig, dass ein Mehrwert durch die Optimierung mit der bestehen Netztopologie nicht erreicht werden kann.

Deutlich bessere Voraussetzungen für die Trennstellenoptimierung liegen vor, wenn bestehende MS-Ringe um eine Mittelsehne mit bestmöglicher Lage erweitert werden und strombegrenzende Kabelstrecken durch den aktuellen Standardkabeltyp ersetzt werden. In 25 der 29 untersuchten Netzen kann in diesem Fall die Auslastung in den Ortsnetzstationen zwischen 5 % und 32 % erhöht werden, was einer zusätzlichen Last im Ring zwischen 0,5 MVA und 4,2 MVA entspricht. In vier MS-Ringen funktioniert die Verschiebung der Trennstellen und damit die Lastverlagerung auf Grund sehr großer Leistungsunterscheide zwischen den Ortsnetzstationen im Ring nicht.

Zur Reduzierung der Unterbrechungszeiten bei einem Kabelfehler im Mittelspannungsnetz werden im untersuchten Netzgebiet und auch bei anderen Netzbetreibern alle Mittelspannungsringe mit der 3-Punkt-Automatisierung ausgestattet. Der zusätzliche manuelle Schaltungsaufwand bei der Trennstellenoptimierung kann durch Schalthandlungen mit den automatisierten Schaltanlagen kompensiert werden.

Zusätzliche Investitions- und Betriebskosten für die Optimierung fallen nur für die Erfassung und Abschätzung der Lastaufteilung bei den unterschiedlichen Schaltzuständen an, die gegenüber dem Netzausbau deutlich günstiger sind. Bei bestehenden Netzen hat die Trennstellenoptimierung deshalb einen wirtschaftlichen Vorteil. Bei der Grundsatzplanung neuer Mittelspannungsnetze ist die klassische Ringtopologie ohne Mittelsehne auf Grund des geringen Kostenunterschieds aber der deutlich höheren Flexibilität zu bevorzugen.

Die Untersuchungen im Simulationsmodell zeigen ein hohes Potential für die Anwendung der Trennstellenoptimierung im Fehlerfall. Die praktische Umsetzung des Konzeptes in einem Pilotprojekt kann wertvolle Erkenntnisse für den tatsächlichen Aufwand und die Wirksamkeit der Optimierung liefern.

7 Literaturverzeichnis

- [1] S. Kreutmayr, C. J. Steinhart, M. Finkel, C. Gutzmann und R. Witzmann, „Integration Potential of Urban MV Grids for Future Loads – Methodology and Analysis in a Real Grid,“ in *CIGRE Chengdu 2019 Symposium*, 2019.
- [2] P. Steffens, *Innovative Planungsgrundsätze für ländliche Mittelspannungsnetze*, Dissertation, Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal, 2018.
- [3] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), *Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030*, Berlin, 2012.
- [4] S. Lang und P. Witzke, Berücksichtigung privater Ladeinfrastruktur in der Netzplanung, *ew - Magazin für Energiewirtschaft* (9/2019).
- [5] C. Frings, S. Jeddi und A. Sitzmann, Netzdienliches Flexibilitätspotenzial von Haushalten mit elektrischer Wärmeversorgung, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* (9/2019).
- [6] M. Müller, A. Zeiselmaier und J. P. Gómez, Tapping flexibility potential of decentralized controllable loads for smart markets through aggregation, Dublin: Grid Integration Week 14. – 18.10.2019.
- [7] VDE Energietechnische Gesellschaft, „Zeichen der Endergiebewende - Realisierung und Pilotprojekte in Berlin und Hamburg,“ 01 01 2014. [Online]. Available: <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/informationen/mi2014-1-t4-schaefer-pilotprojekte>. [Zugriff am 28 11 2019].
- [8] S. Kreutmayr, C. J. Steinhart, M. Finkel und C. Gutzmann, *Bewertung von Methoden zur Lastabschätzung an städtischen Ortsnetztransformatoren – Grundlage für eine effiziente Integration zukünftiger Lasten*, Wien: IEWT 2019, 2019.
- [9] FFE Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., *Projekt Merit Order Netz-Ausbau 2030 - Teilbericht Maßnahmenklassifizierung*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE), 2016.