



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation und Motivation.....	1
1.2	Lösungsansatz .....	2
1.3	Aufbau der Arbeit .....	3
<b>2</b>	<b>Mathematische Modellierung des Mittelspannungsnetzes .....</b>	<b>5</b>
2.1	Netzmodell.....	6
2.1.1	Aufstellung des Netzmodells.....	6
2.1.2	Symmetrische Komponenten.....	8
2.1.3	Aufstellung der Leitungsadmittanzmatrix und der Leistungsstromgleichung .....	9
2.1.4	Aufstellung der Knotenadmittanzmatrix und der Knotenstromgleichung .....	12
2.1.5	Beispiel zur Berechnung von Leitungsadmittanzmatrix und Knotenadmittanzmatrix ....	14
2.2	Leistungsflussgleichungen .....	17
2.2.1	Gleichungen der Leistungsflüsse von Knoten $i$ zu Knoten $j$ .....	17
2.2.2	Gleichungen der Knotenleistungen .....	18
2.3	Zusätzliche Bedingung: Summe der Ströme .....	19
2.4	Jacobi-Matrix .....	21
2.5	Hesse-Matrix .....	23
<b>3</b>	<b>Simulation der Betriebszustände des Stromnetzes.....</b>	<b>25</b>
3.1	Per-Unit-System.....	25
3.2	Newton-Verfahren .....	26
3.3	Leistungsflussberechnung für dreiphasige unsymmetrisch belastete Netze .....	27
3.3.1	Entkopplung des unsymmetrischen Systems für die Leistungsflussberechnung .....	28
3.3.2	Algorithmus zur Leistungsflussberechnung für unsymmetrisch belastete Netze .....	30
3.4	Simulation der Betriebszustände des Mittelspannungsnetzes „Alliander Livelab“.....	34
<b>4</b>	<b>Analyse der Beobachtbarkeit des Drehstromnetzes.....</b>	<b>39</b>
4.1	Überblick zur Beobachtbarkeit von Netzen und allgemeine Lösungsansätze für nicht beobachtbare Netze.....	39



4.2	Klassisches Optimierungsverfahren für die Platzierung der Messungen .....	42
4.3	Neues Verfahren zur Analyse der Beobachtbarkeit basierend auf der Topologie des Netzes....	42
4.3.1	Mathematische Formulierung der vereinfachten Jacobi-Matrix .....	44
4.3.2	Bestimmung der beobachtbaren und nicht beobachtbaren Anteile mithilfe der Singularwertzerlegung .....	46
4.3.3	Vergrößerung der beobachtbaren Gruppen mit eingefügter virtueller Messung .....	49
4.3.4	Bestimmung der nicht redundanten Platzierung der Leitungs- und Spannungsmessung	53
4.4	Beispiel zur Analyse der Beobachtbarkeit des Stromnetzes .....	56
<b>5</b>	<b>Statische Zustandsschätzung für das Mittelspannungsnetz .....</b>	<b>63</b>
5.1	Klassische statische Zustandsschätzung durch die Methode der gewichteten kleinsten Quadrate	63
5.1.1	Methode der gewichteten kleinsten Quadrate .....	64
5.2	Methode der gewichteten kleinsten Quadrate mit Nebenbedingung durch Innere-Punkte- Verfahren .....	71
5.2.1	Innere-Punkte-Verfahren .....	73
5.2.2	Verwendung des Innere-Punkte-Verfahrens für die Zustandsschätzung des Mittelspannungsnetzes .....	77
5.2.3	Lösungsschritte .....	80
5.3	Methode der gewichteten kleinsten Quadrate mit Nebenbedingung als Messung .....	82
<b>6</b>	<b>Dynamische Zustandsschätzung .....</b>	<b>85</b>
6.1	Iterated Extended Kalman Filter (IEKF) .....	85
6.2	Anwendung des IEKF im Mittelspannungsnetz .....	87
6.3	Algorithmus .....	91
<b>7</b>	<b>Simulation des „Alliander LiveLab“ Mittelspannungsnetzes bei unvollständigen Messungen .....</b>	<b>94</b>
7.1	Überprüfung der statischen Zustandsschätzungen im beobachtbaren Alliander LiveLab Mittelspannungsnetz .....	94
7.2	Überprüfung der statischen Zustandsschätzungen im nicht beobachtbaren „Alliander LiveLab“ Mittelspannungsnetz mit idealen Messungen .....	99
7.3	Überprüfung der statischen Zustandsschätzungen im nicht beobachtbaren „Alliander LiveLab“ Mittelspannungsnetz mit realen Messungen .....	104



<b>8 Zusammenfassung .....</b>	<b>110</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>113</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>119</b>
<b>9 Anhang.....</b>	<b>121</b>
9.1 Zweite Ableitung des Systems .....	121
9.2 Erstellung von idealen und realen Messwerten .....	129
9.3 Beispiel zur Analyse der Beobachtbarkeit aus Kapitel 4.4 .....	136