

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Stand der Technik	1
1.2	Ziel der Arbeit.....	2
1.3	Struktur der Arbeit	3
2	Grundlagen	4
2.1	Elektroenergiequalität und EMV Koordinierung.....	4
2.2	Allgemeine Bewertungsgrößen	7
2.2.1	Gleichphasigkeitsindizes	7
2.2.2	Qualitätsreserve	9
2.2.3	Quantil.....	9
2.3	Betriebsmittelbelastung.....	9
2.4	Verlustleistung und -energie.....	10
2.5	Langsame Spannungsänderung	10
2.6	Unsymmetrie-Kenngrößen	12
2.6.1	Spannungsunsymmetrie.....	15
2.6.2	Stromunsymmetrie	17
2.6.3	Unsymmetrische Leistung	19
3	Einflussfaktoren auf die Unsymmetrie	23
3.1	Übergeordnetes Netz.....	23
3.2	Transformator.....	24
3.3	Leitung	26
3.4	Erdung.....	27
3.5	Kundenanlagen.....	32
3.5.1	Anschluss der Kundenanlagen.....	32
3.5.2	Statisches Verhalten hinsichtlich Spannungs- und Frequenzabhängigkeit....	33
3.5.3	Analytisches Modell zur vereinfachten Abschätzung der Spannungsunsymmetrie.....	34
3.6	Zusammenfassende Bewertung der Einflussfaktoren	39
3.7	Maßnahmen zur Reduzierung der Unsymmetrie	40
3.7.1	Verringerung der Gegensystemspannung des übergeordneten Netzes	41
3.7.2	Verringerung der wirksamen Gegen- bzw. Nullsystemimpedanz am Verknüpfungspunkt	42
3.7.3	Verringerung des Gegen- bzw. Nullsystemstroms der anzuschließenden Kundenanlage	42
3.7.4	Erhöhung der unsymmetrischen Lastimpedanz parallel betriebener Anlagen	43
3.7.5	Beeinflussung des Phasenwinkels des Gegen- bzw. Nullsystemstroms	43
3.8	Auswahl des Messorts zur Bestimmung der höchsten Spannungsunsymmetrie	46
4	Simulationskonzept und -modelle	48
4.1	Auswahl an Kundenanlagen	48

4.1.1	Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz	48
4.1.2	Elektrofahrzeuge.....	50
4.2	Simulationsablauf.....	51
4.2.1	Wahl eines Simulationsszenarios und eines Simulationsnetzes	52
4.2.2	Installation von Photovoltaikanlagen und Ladepunkten für Elektrofahrzeuge	53
4.2.3	Festlegung von zu simulierender Zeitdauer und Mittelungsintervall	53
4.2.4	Lastflussberechnung je Zeitschritt	54
4.3	Stochastische Beschreibung der gleichzeitig ladenden Elektrofahrzeuge je Außenleiter – zentrales Laden	54
4.4	Simulationsmodelle - dezentrales Laden.....	56
4.4.1	Übergeordnetes Netz	56
4.4.2	Betriebsmittel des Niederspannungsnetzes	59
4.4.3	Kundenanlagen.....	61
5	Simulationsergebnisse	71
5.1	Zentrales Laden.....	71
5.1.1	Methodik	71
5.1.2	Auslastung der Betriebsmittel.....	72
5.1.3	Leitungsverluste	73
5.1.4	Unsymmetrischer Leistungsanteil.....	73
5.1.5	Spannungsunsymmetrie und Spannungsdifferenz.....	74
5.2	Dezentrales Laden.....	76
5.2.1	Methodik	76
5.2.2	Auslastung der Betriebsmittel.....	77
5.2.3	Leitungsverluste	79
5.2.4	Spannungsdifferenz	80
5.2.5	Unsymmetrischer Leistungsanteil.....	81
5.2.6	Spannungsunsymmetrie	83
5.2.7	Bewertung möglicher Maßnahmen zur Reduzierung der Spannungsunsymmetrie.....	89
5.2.8	Einfluss unsymmetrischer Koppelimpedanzen auf die Spannungsunsymmetrie	92
5.3	Resümee und Handlungsempfehlungen.....	94
6	Niederspannungsäquivalent für unsymmetrische Leistungsanteile	97
6.1	Lastgang der unsymmetrischen Leistungsanteile.....	97
6.2	Geräteklassenabhängiger unsymmetrischer Leistungsanteil	99
6.2.1	Unsymmetrischer Leistungsanteil Haushaltslasten	99
6.2.2	Unsymmetrischer Leistungsanteil Elektrofahrzeuge.....	99
6.2.3	Unsymmetrische Leistungsanteile PV-Anlagen.....	103
6.3	Überlagerung der Zeitverläufe	104
6.4	Beispiel	105

7 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick	107
Literaturverzeichnis	110
Anhang	118