

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