

# Inhalt

<b>I. Vorwort</b> .....	<b>13</b>
<b>II. Management Summary</b> .....	<b>15</b>
<b>1. Motivation &amp; Zielsetzung</b> .....	<b>17</b>
<b>2. Begriffsdefinitionen</b> .....	<b>18</b>
<b>3. Auswahl der Auswertekenngrößen</b> .....	<b>19</b>
3.1 Stromkenngrößen.....	19
3.2 Spannungskenngrößen .....	19
<b>4. Grundlagen der Spannungsunsymmetrie</b> .....	<b>22</b>
4.1 Koordinierung .....	22
4.2 Beziehung zwischen unsymmetrischem Leistungsanteil und Spannungsunsymmetrie ..	24
4.3 Überlagerung und Bewertung der Beiträge zur Spannungsunsymmetrie .....	24
4.3.1 Symmetrische Bedingungen / ohne Hintergrundpegel.....	24
4.3.2 Unsymmetrischen Bedingungen / mit Hintergrundpegel .....	24
<b>5. Inhalt &amp; Aufbau der Studie</b> .....	<b>26</b>
<b>6. Metastudie Unsymmetrie</b> .....	<b>28</b>
6.1 Vorgehen.....	29
6.2 Ergebnisse .....	29
6.2.1 Allgemeine Analyse und Schlussfolgerungen für die Studie .....	29
6.2.2 Allgemeine Erkenntnisse zur Unsymmetrie .....	30
6.2.3 Elektromobilität.....	32
6.2.4 Wärmepumpen.....	33
6.2.5 Photovoltaik und Heimspeicher .....	33
6.3 Leistungsgrenzwerte International .....	34
<b>7. Messung zur Untersuchung unsymmetrisch betriebener Geräte</b> .....	<b>35</b>
7.1 Charakterisierung unsymmetrisch betriebener Geräte- Gerätecatalog.....	35
7.2 Lastprofilmessung .....	36
7.2.1 Erzeuger .....	36
7.2.2 Messung von Elektrofahrzeugen .....	37
7.2.3 Messung von Haushaltsgeräten .....	39
<b>8. Analyse der aktuellen Pegel der Unsymmetrie</b> .....	<b>42</b>
8.1 Vorgehensbeschreibung.....	42
8.2 Kategorisierung der untersuchten Niederspannungsnetze.....	42
8.3 Auswertung der Sommermessung.....	44
8.3.1 Strombasierte Kenngrößen .....	44
8.3.2 Spannungsbasierte Kenngrößen.....	49
8.4 Vergleich zwischen Sommer- und Wintermessung .....	53
8.4.1 Strombasierte Kenngrößen .....	53
8.4.2 Spannungsbasierte Kenngrößen.....	55
8.5 Zusammenfassung .....	56

<b>9. Dokumentation der Erfahrungen von Netzbetreibern .....</b>	<b>57</b>
9.1 Netze mit hohem Anteil unsymmetrisch angeschlossener Geräte.....	57
9.2 Beobachtete Auffälligkeiten hinsichtlich der Unsymmetrie .....	57
9.3 Maßnahmen zur Reduzierung negativer Auswirkungen durch Unsymmetrie .....	58
9.4 Beobachtete Auffälligkeiten anderer Netzzrückwirkungen .....	58
<b>10. Einfluss typischer Kombinationen unsymmetrisch betriebener Geräte .....</b>	<b>59</b>
10.1 Vorgehensbeschreibung .....	59
10.2 Auswertung von Elektrofahrzeugmessungen.....	60
10.2.1 Strombasierte Kenngrößen .....	61
10.2.2 Spannungsunsymmetrie.....	64
10.3 Auswertung von Feldmessungen .....	65
10.3.1 Auswahl an Kategorien .....	65
10.3.2 Strombasierte Kenngrößen .....	66
10.3.3 Spannungsunsymmetrie.....	69
10.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	71
<b>11. Netzimpedanzmessungen .....</b>	<b>72</b>
11.1 Messsystem und Messprinzip .....	72
11.2 Auswahl der Niederspannungsnetze .....	72
11.3 Messergebnisse .....	73
<b>12. Simulationen .....</b>	<b>76</b>
12.1 Eingangsdaten .....	76
12.1.1 Lastprofilgenerator .....	76
12.1.2 Synthetische Erzeugung der Elektromobilität Ladezeitreihen und Standzeiten ...	78
12.1.3 Modellierung der Wärmepumpenzeitreihen .....	80
12.1.4 Erweiterung und Plausibilisierung der Musternetze .....	81
12.2 Durchdringungsfaktoren .....	86
12.3 Methodik .....	87
12.3.1 Variation unsymmetrische Anschlussleistung .....	87
12.3.2 Heimspeicher .....	88
12.3.3 Phasenverteilung .....	89
12.3.4 Durchführung der Monte-Carlo-Simulationen .....	89
12.4 Gleichzeitigkeitsfaktoren .....	90
12.4.1 Wärmepumpen.....	91
12.4.2 Elektrofahrzeuge .....	92
12.5 Einfluss von unsymmetrischen Ladevorgängen.....	93
12.5.1 Optimierung durch intelligente Phasenverteilung.....	100
12.5.2 Zusammenfassung.....	102
12.6 Einfluss von Wärmepumpen.....	103
12.7 Einfluss von unsymmetrischer PV-Einspeisung.....	104
<b>13. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen.....</b>	<b>108</b>
13.1 Anpassung des zulässigen Unsymmetrie-Grenzwertes der Bemessungsscheinleistung beim Anschluss und Betrieb von elektrischen	

Verbrauchsmitteln, Erzeugungsanlagen und Speichern für Kundenanlagen am öffentlichen Niederspannungsnetz.....	108
13.2 Weitere Handlungsempfehlungen .....	110
13.2.1 Netzbetreiber.....	110
13.2.2 Gerätehersteller .....	111
13.2.3 Sonstiges .....	112
<b>14. Ausblick.....</b>	<b>113</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>114</b>
<b>Anhänge .....</b>	<b>118</b>
<b>A. Anhang.....</b>	<b>118</b>
A.I. Quellenliste Metastudie Unsymmetrie.....	118
A.II. Ergänzende Abbildungen zur Analyse des aktuellen Pegels der Unsymmetrie.....	120
A.III. Formular zur Erfassung von Auffälligkeiten hinsichtlich der Strom- und Spannungsqualität.....	123
A.IV. Tabelle Übersicht der Anzahl angeschlossenen Haushalte, Ladepunkte und PV-Anlagen bei KVS und TSS.....	124
A.V. Im LPG verwendete Ausstattungsgrade .....	124
A.VI. Boxplot der Null- zu Mitsystem Verhältnisse der mittels Netzimpedanzmessung untersuchten Niederspannungsnetze .....	125
A.VII. Interpolation der Simualtionsergebnisse Tabelle 12-13 auf abweichende Durchdringungsgrade und ableitung eines kritischen Grenzszenarios .....	126